



Misure Meccaniche e Collaudi

(A. A. 2020/21)

Controlli non distruttivi con ultrasuoni

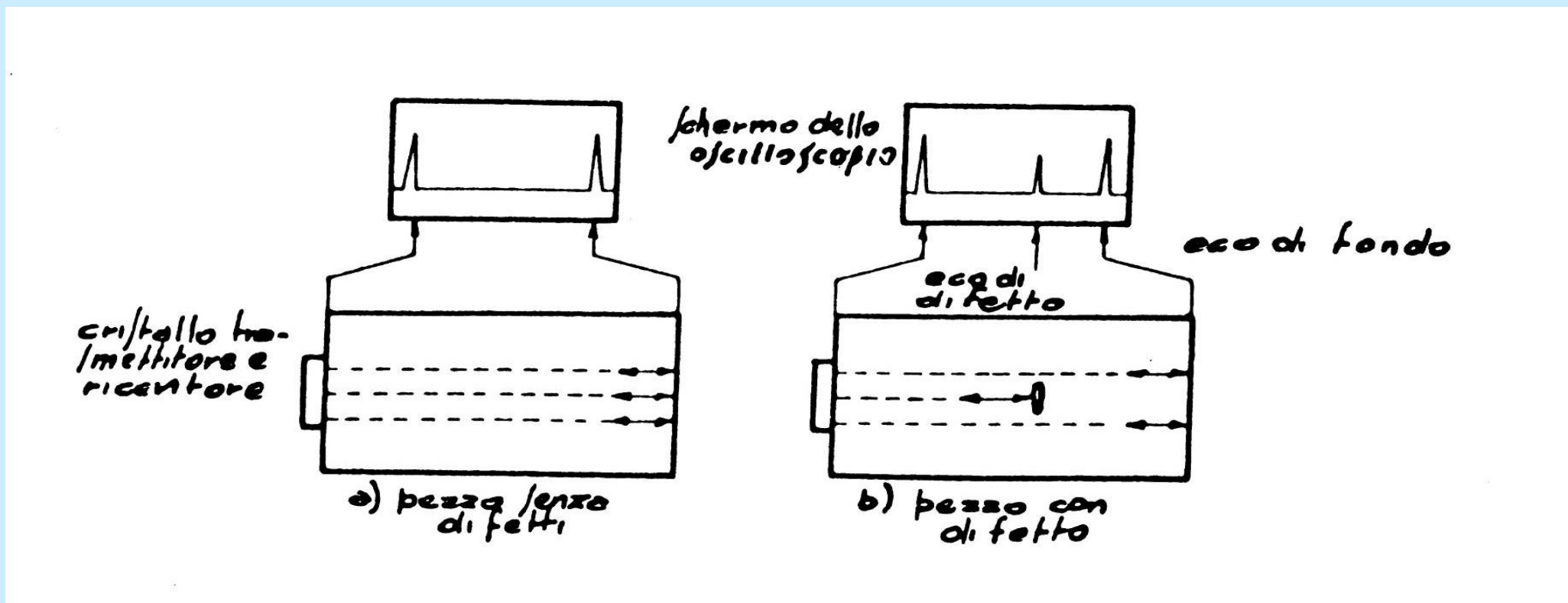
M. De Lucia / D. Vangi



Ispezione con ultrasuoni

- **L'ispezione con ultrasuoni fornisce informazioni sulla situazione interna in un componente in termini di variazione delle modalità di propagazione e riflessione di una onda ultrasonora nel passaggio, attraverso il componente (difettato), da un trasduttore trasmittente ad uno ricevente.**

Ispezione con ultrasuoni

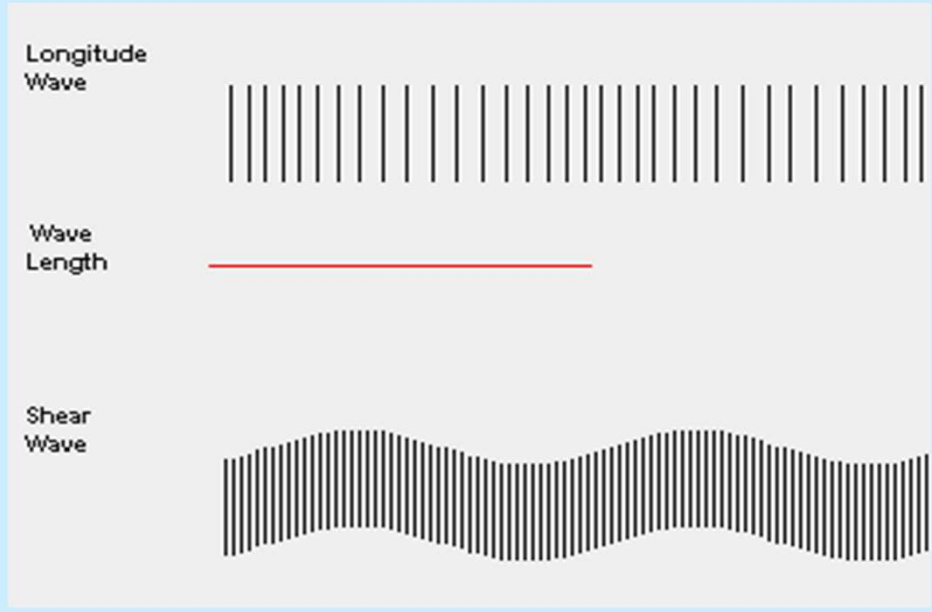
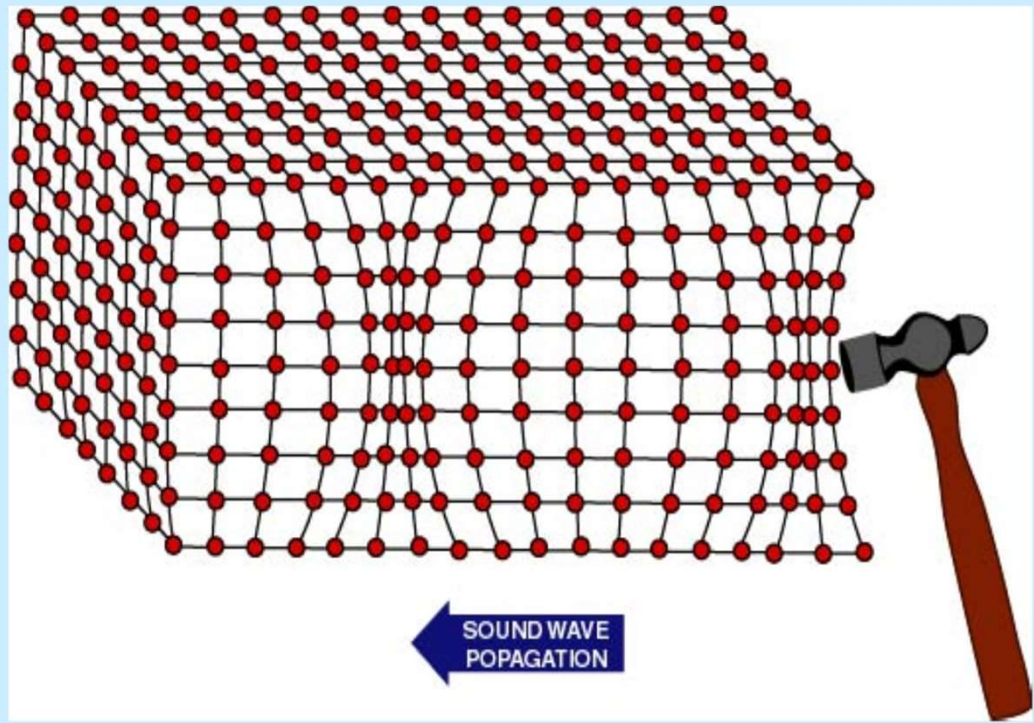




Ispezione con ultrasuoni

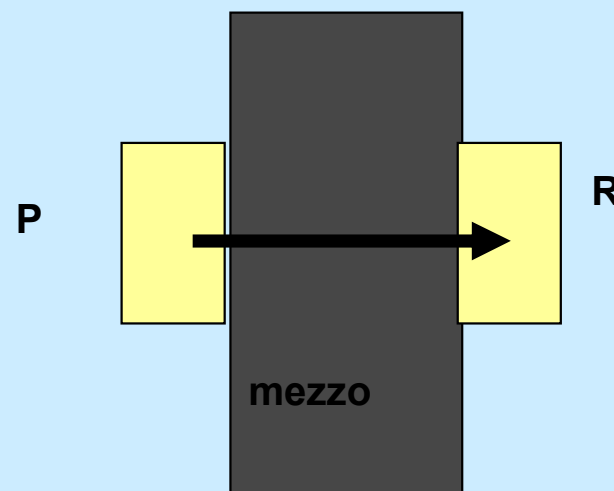
- **L'efficacia del metodo dipende da:**
 - tipo ed orientazione della discontinuità
 - componente ispezionato
 - tecnica e procedura utilizzata
 - esperienza dell'ispettore

Principio fisico



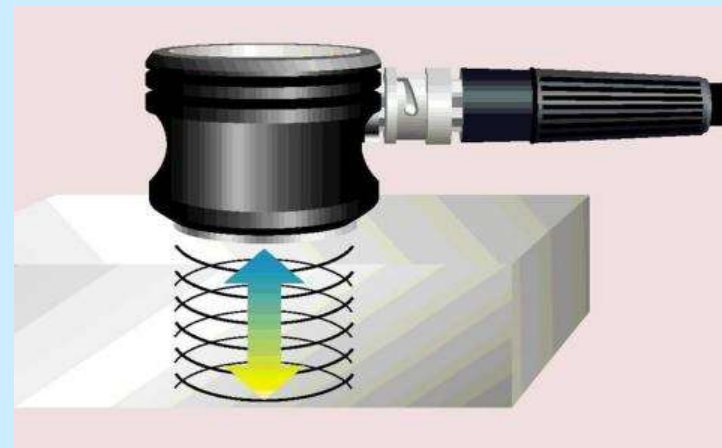
Ispezione con ultrasuoni

- **Il materiale è un filtro che modifica il segnale che lo attraversa**
- **Ingresso del segnale (Pulse)**
- **Attraversamento del mezzo \Rightarrow il segnale si modifica**
- **Acquisizione del segnale in uscita (Receive) \Rightarrow confronto**

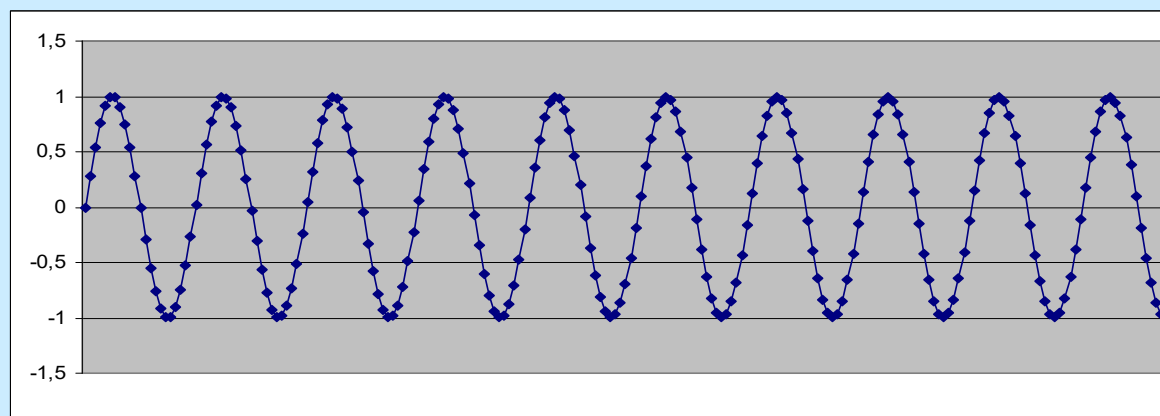


Generazione degli ultrasuoni

- **Ultrasuoni: onde meccaniche (fascio ultrasonoro) che si propagano nel mezzo**
- **Il fascio ultrasonoro è generato da un trasduttore (sonda).**
- **Sonda = trasduttore piezoelettrico = impulso elettrico \Leftrightarrow vibrazione meccanica**
- **Ultrasuoni: onde con frequenze nel range 20 kHz – 1 GHz**



Ultrasuoni = fenomeno ondulatorio



Proprietà (ampiezza, frequenza / periodo, lunghezza d'onda):

• $A \sin \omega t$ $f = \omega / 2 \pi$ $\lambda = v / f = vT$

Un'onda ultrasonora si descrive quindi attraverso:

- A, f, λ, T, v
- **Modo di vibrare**

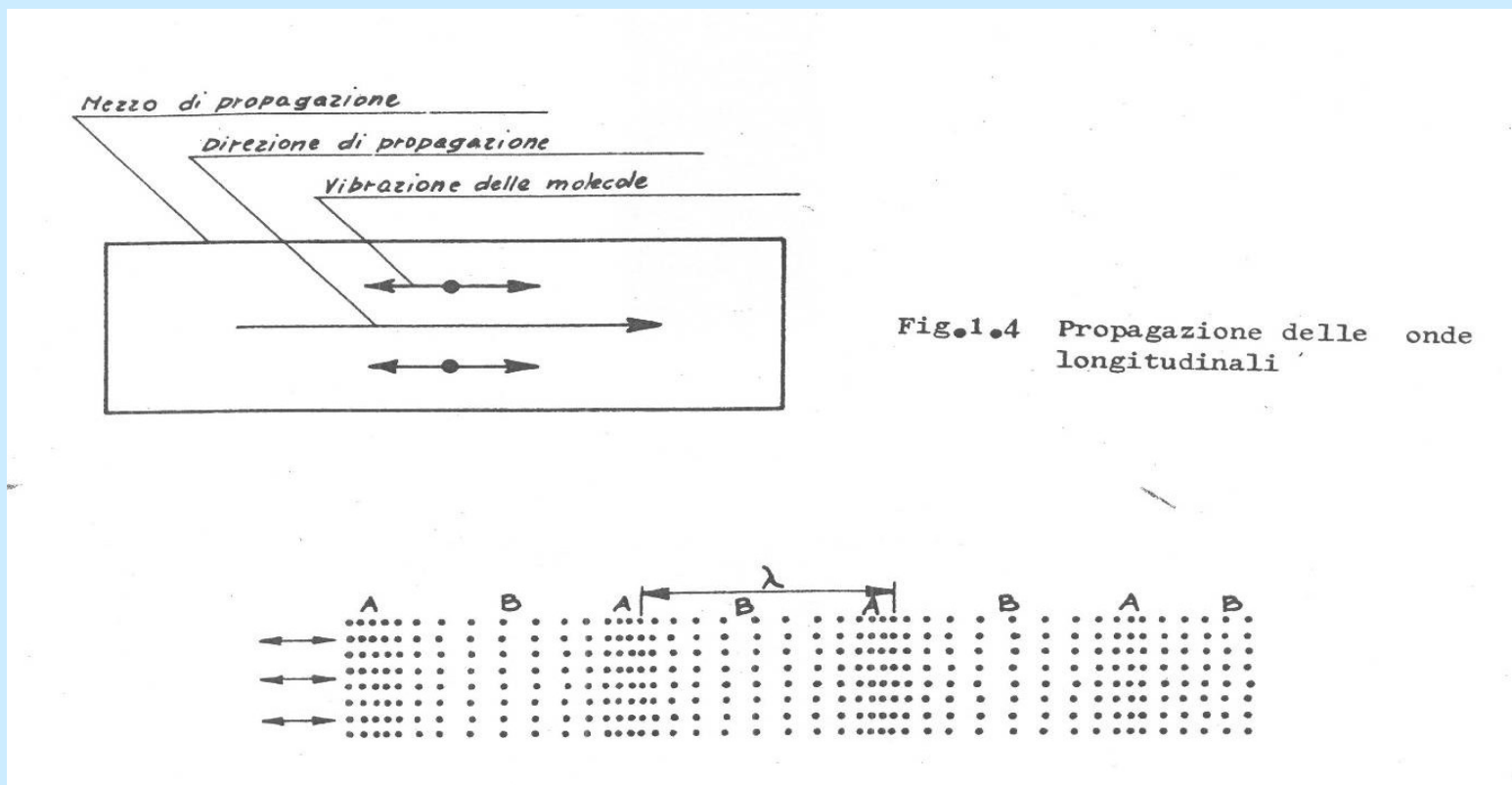


Modi di vibrare

- **Onde longitudinali**
- **Onde trasversali**
- **Onde superficiali**

Onde longitudinali

- **Spostamento delle particelle parallelo alla direzione di propagazione dell'onda**
- **Si propagano in liquidi, solidi, gas**



Onde trasversali

- **Spostamento delle particelle perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda**
- **Si propagano solo nei solidi**

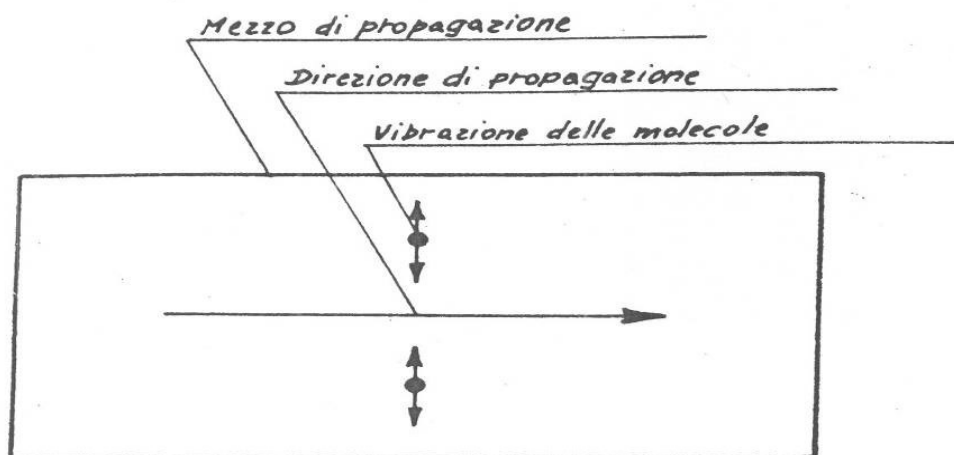
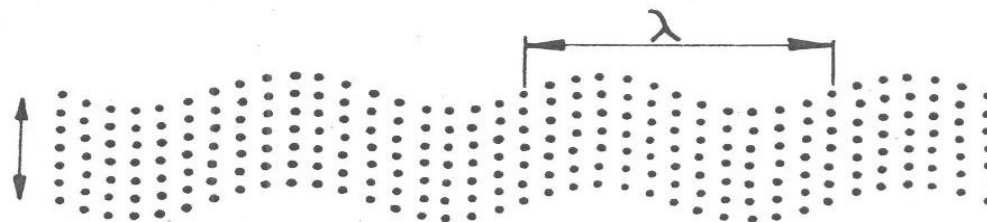


Fig.1.6 Propagazione delle onde trasversali

Fig.1.7 Onde trasversali



Onde superficiali (di Rayleigh)

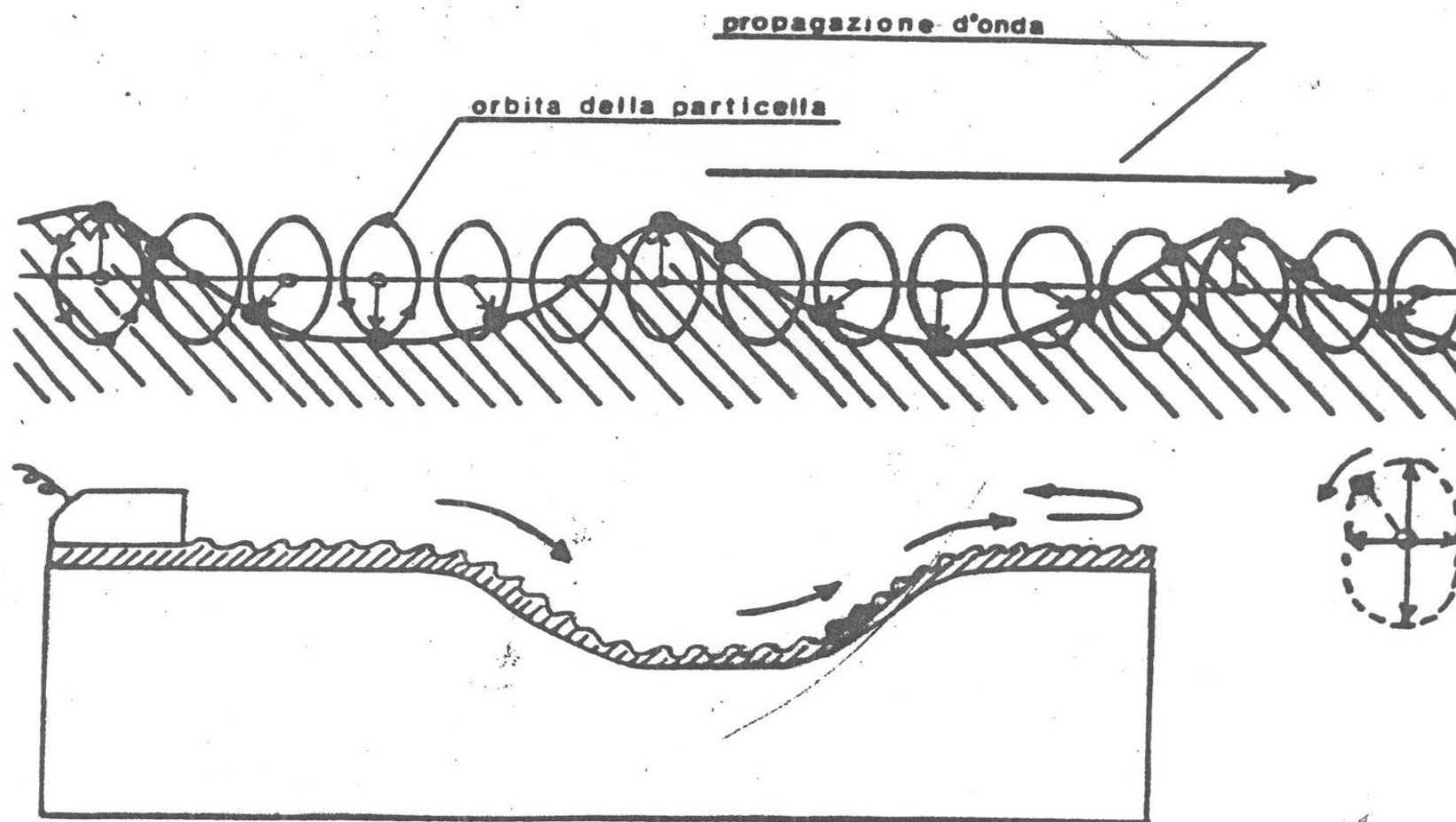
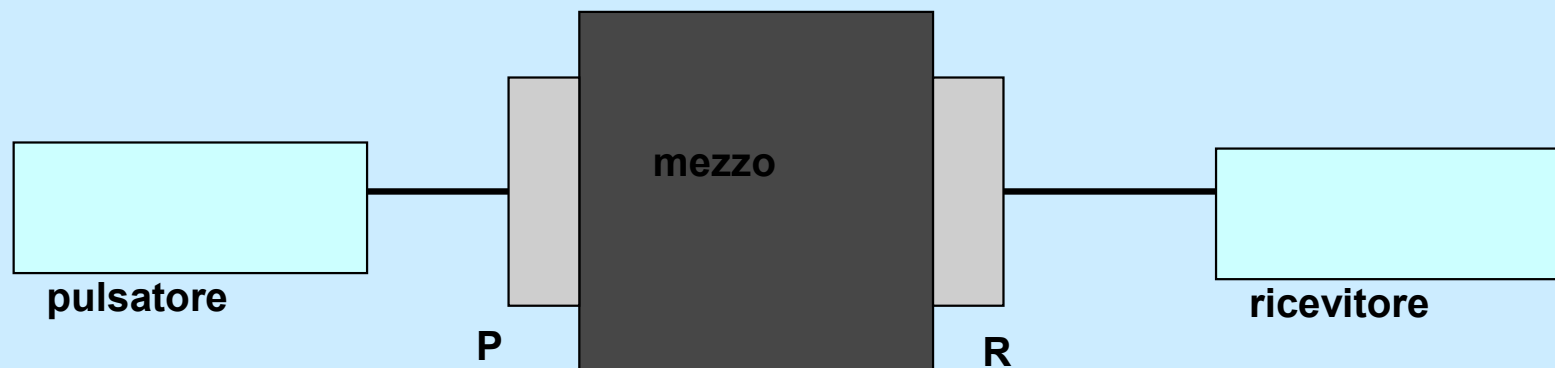


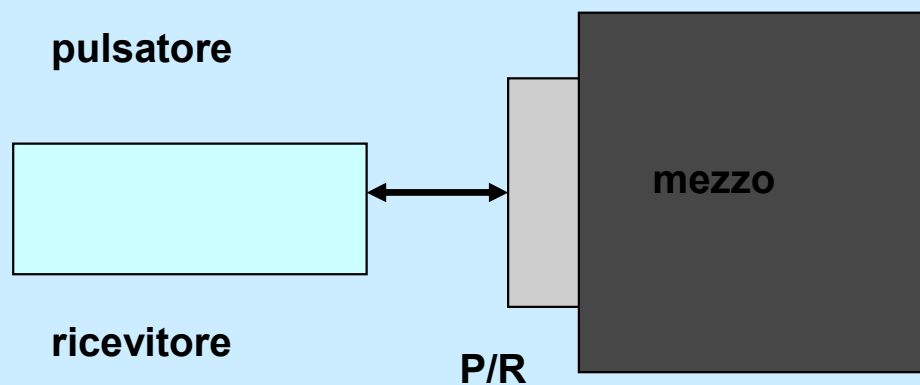
Fig. 105 - Onde superficiali (o di Rayleigh).

Tecniche di osservazione

in trasmissione (through):

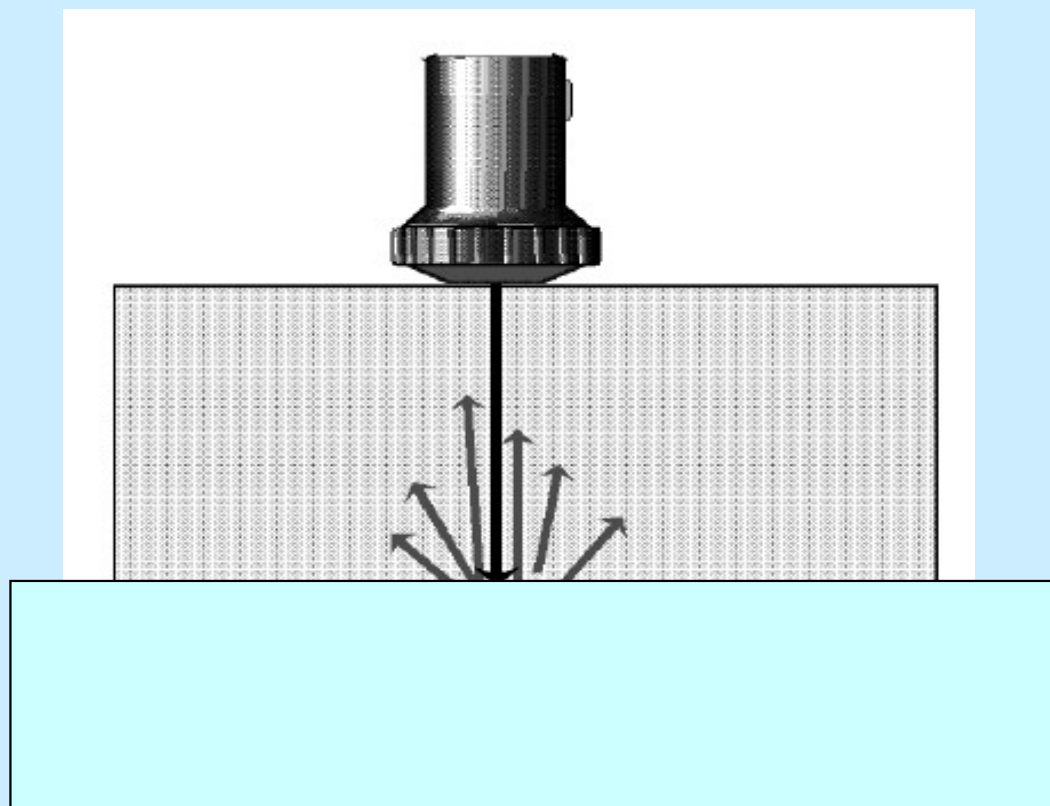


per riflessione (pulse-echo):



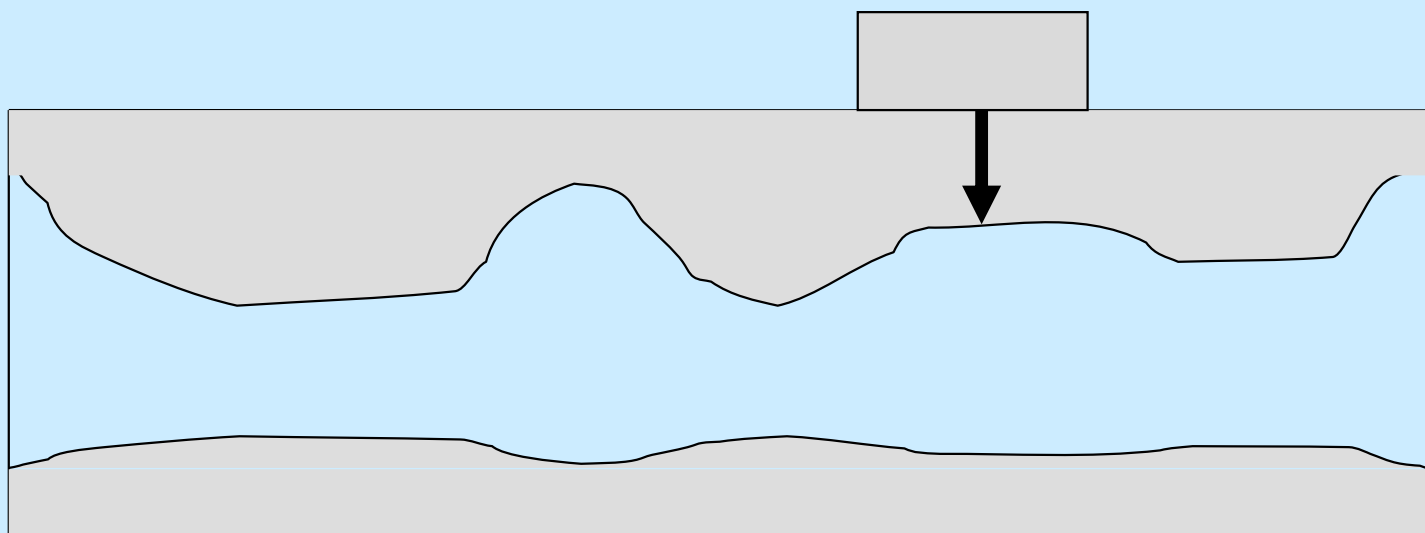
Tempo di volo (time of flight – tof)

- **Spessore = velocità * tempo**
- **Velocità nota \Rightarrow tempo di volo \Rightarrow spessore**



Misura di spessore: corrosione - erosione

- **Tipo di danno (effetti visibili del danno) = variazione di spessore**



Misura di velocità

- **Onde longitudinali in barra sottile**

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

- **Onde longitudinali in fascio largo**

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

- **Onde trasversali**

$$V = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

- **E modulo di Young**
- **G modulo di elasticità trasversale**
- **ν coeff. di Poisson**
- **ρ densità**

Caratteristiche elastiche (E, ν, G)

- **La velocità dipende dalle caratteristiche elastiche:
Misura della velocità \Rightarrow valutazione di E, ν, G**

La velocità è influenzata anche da:

- temperatura
- stato di sforzo

Velocità di propagazione

Materiali	ρ (kg/m ³) $\times 10^3$	V_L (fascio largo) (m/s) $\times 10^3$	V_T (m/s) $\times 10^3$
<i>Metallici</i>			
Acciaio al carbonio	7,8	5,85	3,23
acciaio inox 302	8,03	5,60	3,10
alluminio	2,7	6,30	3,09
berillio	1,82	12,80	8,71
bronzo (al fosforo)	8,86	3,53	2,23
cadmio	8,6	2,80	1,50
costantana	8,8	5,22	2,62
ghisa grigia	7,2	3,8 ÷ 4,4	2,2 ÷ 2,8
ghisa sferoidale	7,2	5,6	3,2
inconel	8,25	7,80	3,0
magnesio	1,74	5,78	3,10
mercurio	13,6	1,42	—
molibdeno	10,1	6,29	3,35
monel	8,83	6,0	2,70
nicel	8,8	5,62	2,96
ottone	8,60	3,83 ÷ 4,43	2,05 ÷ 2,12
piombo	11,4	2,16	0,70
rame	8,9	4,68	2,26
titanio (Ti 150 A)	4,54	6,10	3,10
tungsteno	19,3	5,40	2,80

Metalli

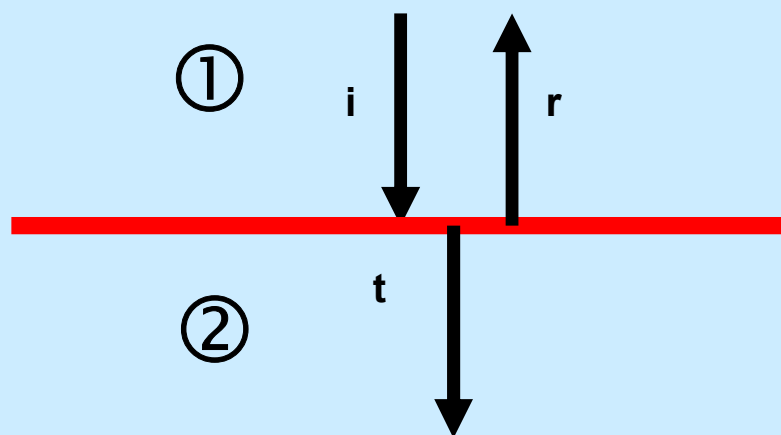
Velocità di propagazione

Altri materiali

Materiali	ρ (kg/m ³) $\times 10^3$	V_L (fascio largo) (m/s) $\times 10^3$	V_T (m/s) $\times 10^3$
<i>Non metallici</i>			
Gomma soffice	1,3 ÷ 2,1	1,58	
gomma vulcanizzata	1,1 ÷ 1,6	2,3	
nylon	1,0 ÷ 1,2	1,8 ÷ 2,2	
pirex	2,23	5,50	3,12
polistirene	1,05	2,67	
porcellana	2,4	5,6 ÷ 6,2	
quarzo fuso	2,20	5,70	3,60
resine acriliche (plexiglas)	1,18	2,67	1,13
teflon	2,2	1,35	
vetro in lamina	2,51	5,70	3,40
<i>Liquidi</i>			
Acqua (a 20 °C)	1,0	1,483	
glicerina	1,26	1,92	
olio da trasformazione	0,92	1,38	
olio per motori diesel	0,88 ÷ 1,02	1,25	

Attraversamento dell'interfaccia fra due materiali: incidenza normale

- p pressione ; v velocità
- pedice: i incidente ; r riflesso ; t trasmesso



Impedenza acustica (z)

$$z = p / v$$

$$z = \rho \cdot v$$

$$R = \frac{p_r}{p_i} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}$$

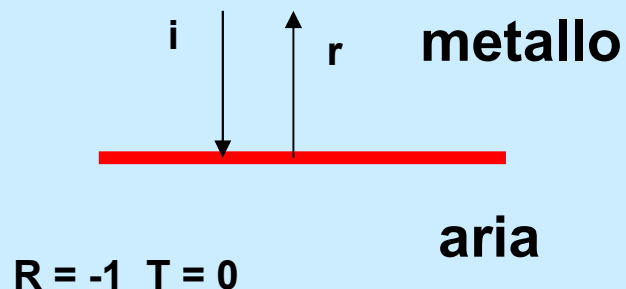
(coeff. di riflessione)

$$T = \frac{p_t}{p_i} = \frac{2z_2}{z_1 + z_2}$$

(coeff. di trasmissione)

Esempi:

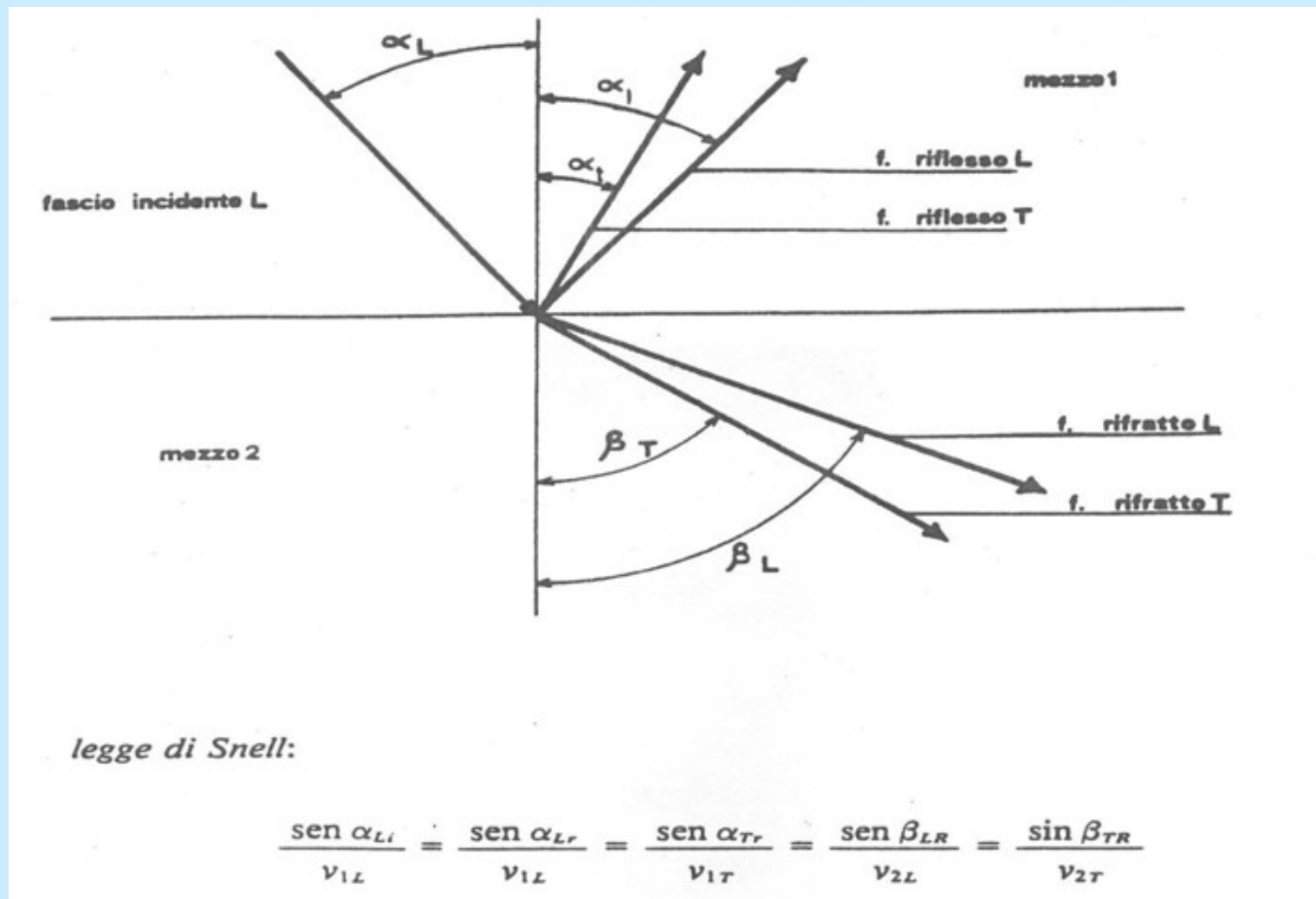
$z_1 \gg z_2$ metallo / aria



$z_1 = z_2$ (nessuna interfaccia)



Attraversamento dell'interfaccia fra due materiali: incidenza obliqua - conversione di modo



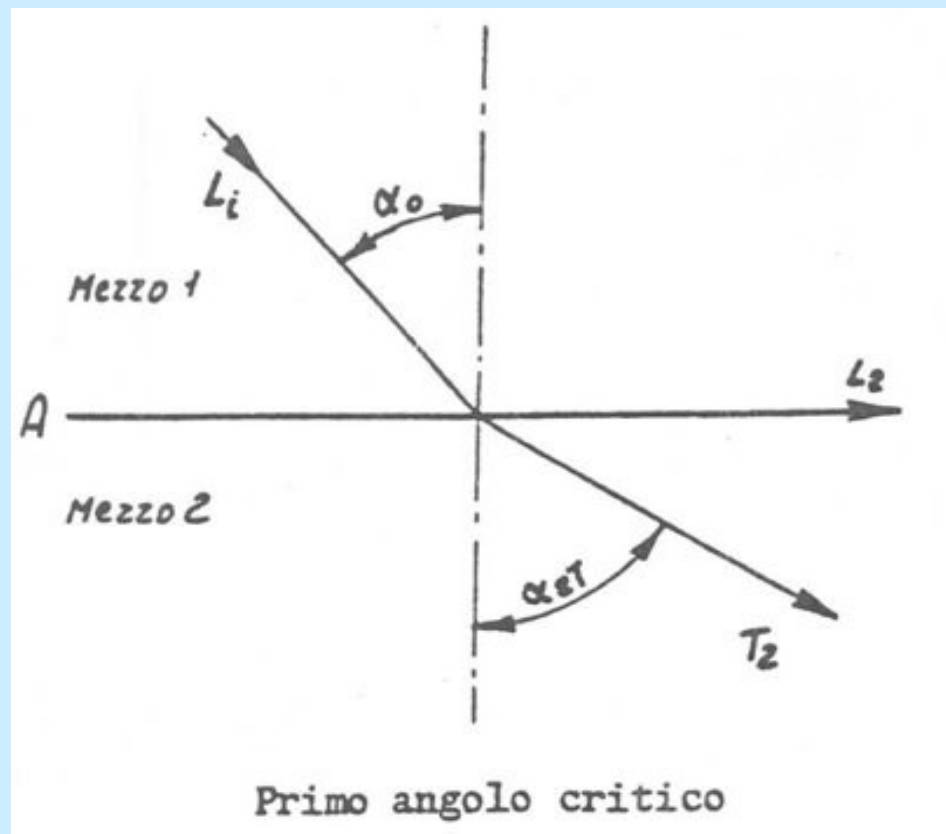
L = longitudinale
T = trasversale

Legge di Snell – angoli critici

I fenomeni che avvengono all'interfaccia fra due mezzi possono essere sfruttati per generare dei tipi particolari di onde: onde criticamente rifratte, in corrispondenza degli angoli critici (cioè rifratte con un angolo di 90°).

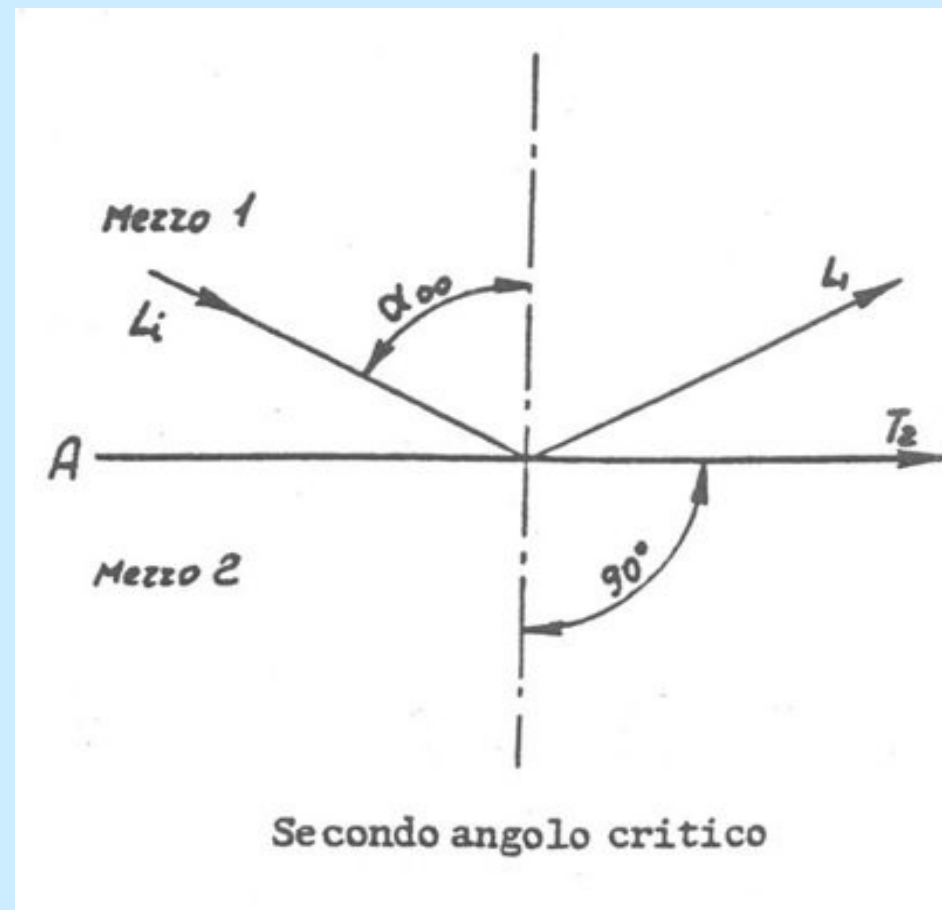
In corrispondenza del primo angolo critico si genera un'onda **longitudinale** che corre parallela alla superficie.

Superato tale angolo l'onda longitudinale rifratta non esiste più.



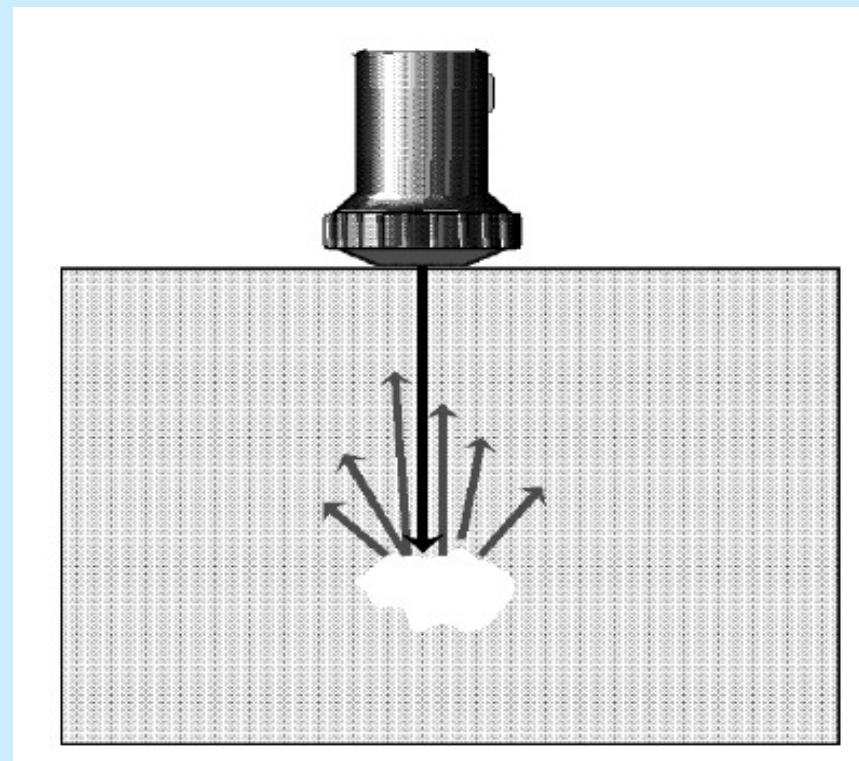
Legge di Snell – angoli critici

In corrispondenza del secondo angolo critico si genera un'onda **trasversale** che corre parallela alla superficie.
Superato tale angolo l'onda trasversale rifratta non esiste più.

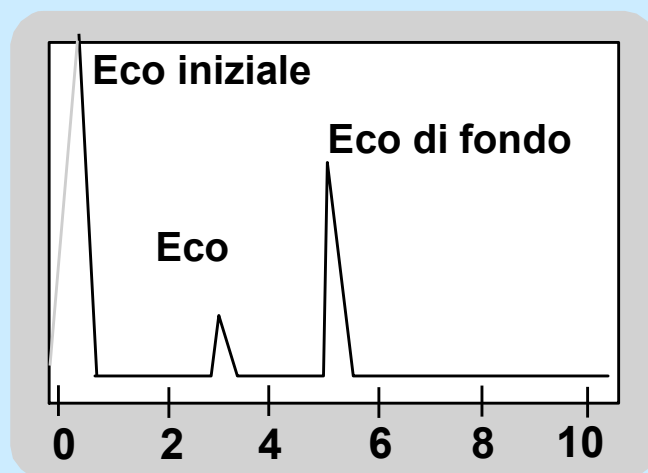


Principi del controllo

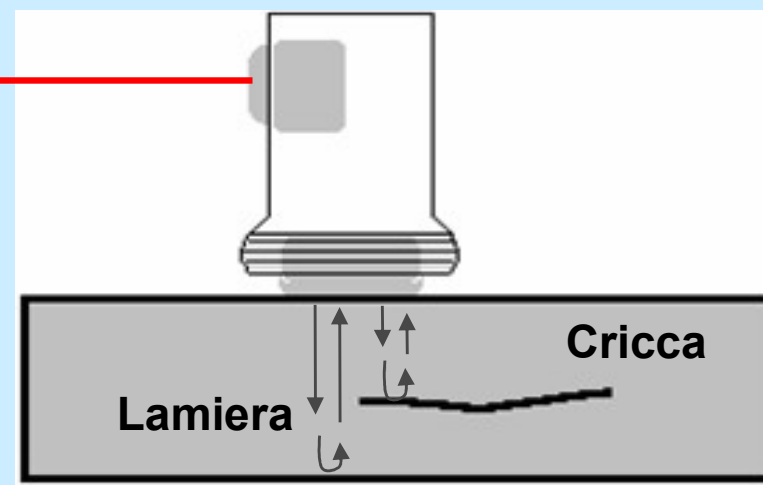
- Il fascio immesso nel materiale si propaga in linea retta, a velocità costante, sino al più vicino riflettore
- In prossimità del riflettore, parte del fascio viene trasmessa e parte riflessa
- La quota parte riflessa è in grado di fornire indicazioni sulle caratteristiche del riflettore
- Il “tempo di volo” consente di posizionare il riflettore, nota la velocità di propagazione del fascio



Principi del controllo



UT Instrument
Screen



Propagazione in un materiale \Rightarrow variazione di ampiezza

Varie cause:

- **Attenuazione (spreading), dovuta a ragioni geometriche**
- **Assorbimento (il moto delle particelle dissipa calore - processo non reversibile)**
- **Scattering (interazioni con il grano cristallino - dipende da λ)**

λ piccola = “vede” difettosità piccole / elevato scattering

λ grande = trasparente alle discontinuità / basso scattering

(Scattering: effetto utilizzabile per la valutazione del grano cristallino)

Propagazione / variazione di velocità

- **La velocità varia con la temperatura (effetto di disturbo)**
- **La velocità varia con la tensione meccanica = acustoelasticità ⇒ valutazione tensioni residue, tensioni di origine termica, etc.**

Variazioni di frequenza

- **Spostamento in frequenza della risposta = analisi spettro della risposta**
- **Valutazione spostamento in frequenza ⇒ informazioni di tipo statistico sulla morfologia del materiale**

Sono effetti piccoli, rilevabili con difficoltà.

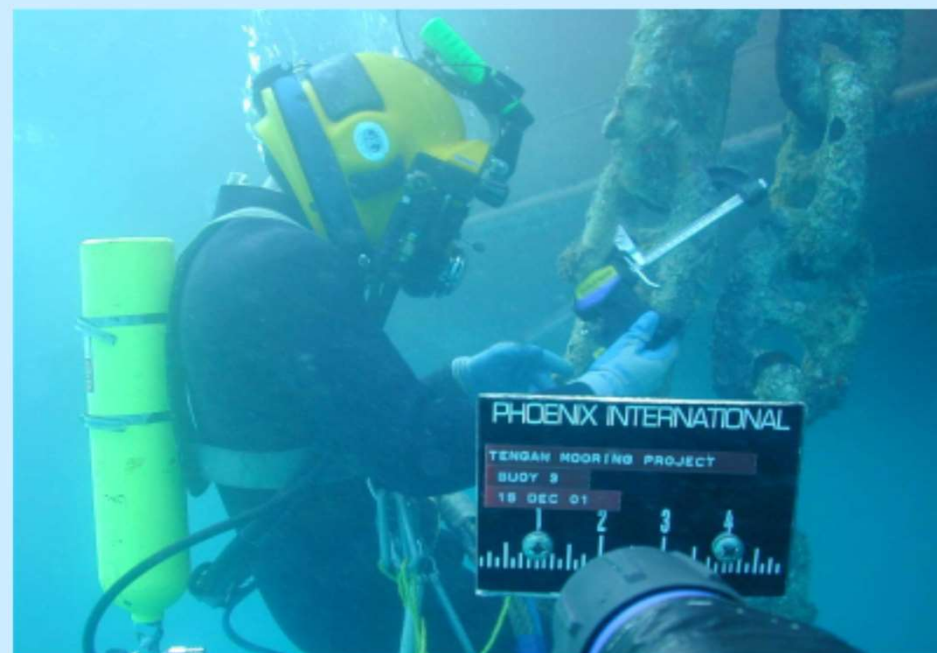
Applicazioni

- **Difettoscopia**
- **Misure di spessore (in presenza di corrosione, erosione ...)**
- **Verifiche di giunti incollati o brasati**
- **Verifica della frazione di vuoto in plastici o compositi**
- **Misura della profondità degli strati trattati superficialmente negli acciai**
- **Stima della dimensione del grano cristallino**
- **Ecc.**



Vantaggi

- Possibilità di rilevare difetti superficiali ed interni.
- Possibilità di controllare spessori notevoli.
- Possibilità di eseguire controlli con accessibilità da un solo lato.
- Capacità di dimensionare e posizionare la discontinuità.
- Ridotta preparazione dei pezzi.
- Risultati in tempo reale.
- Rappresentazioni bi e tridimensionali molto significative.
- Applicazioni spessimetriche.

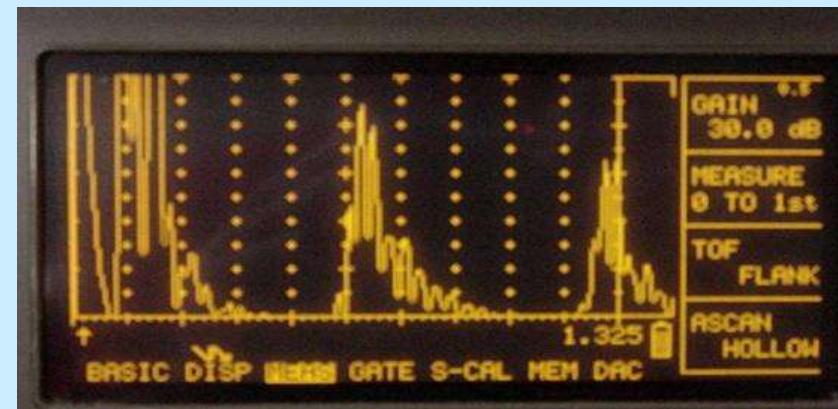


Svantaggi

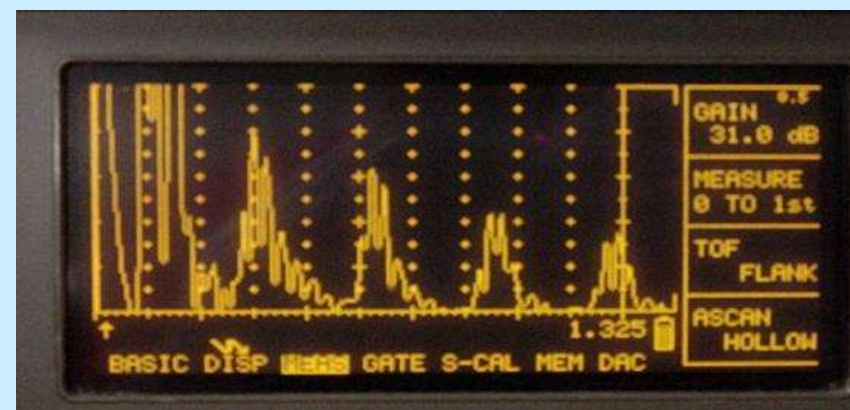
- **Accessibilità diretta della superficie.**
- **Addestramento ed esperienza del personale.**
- **Impiego di mezzi di accoppiamento.**
- **Materiali rugosi, di forma irregolare, molto sottili o disomogenei possono essere difficili da ispezionare**
- **Difficoltà nel controllo di materiali a grano grosso o struttura austenitica.**
- **Importanza nella giacitura del difetto.**
- **Complessità delle tarature preliminari.**



Es.: verifica di difetti di laminazione in una trave laminata



Segnale relativo al laminato sano

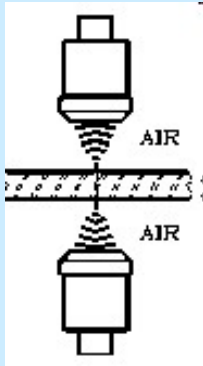


Segnale con echi intermedi

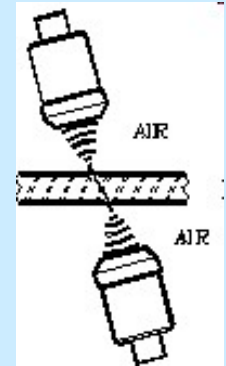
Fare clic per modificare lo stile del titolo dello schema

- in aria

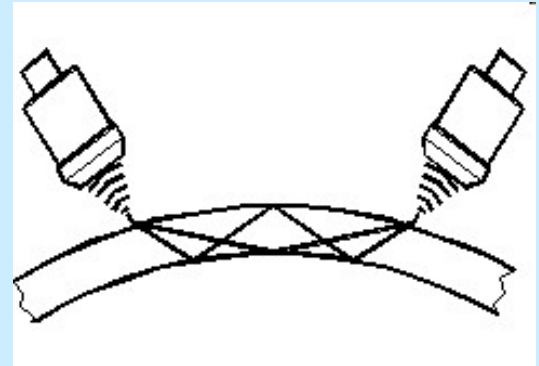
incidenza
normale



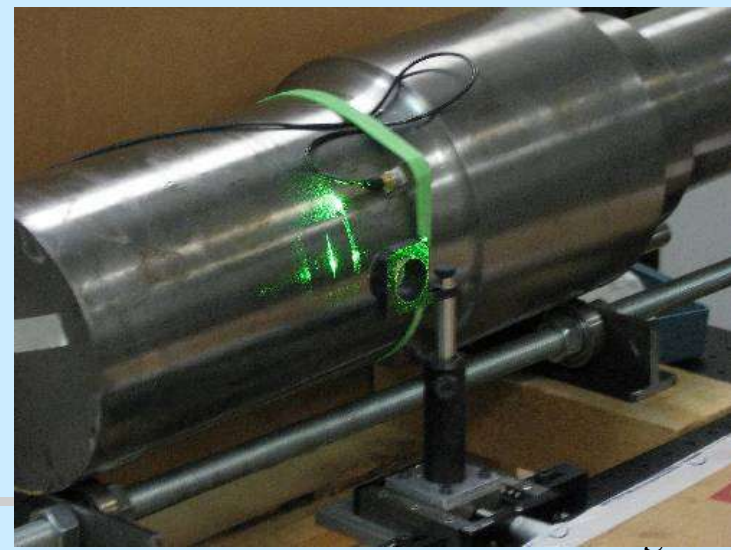
incidenza
obliqua



riflessione



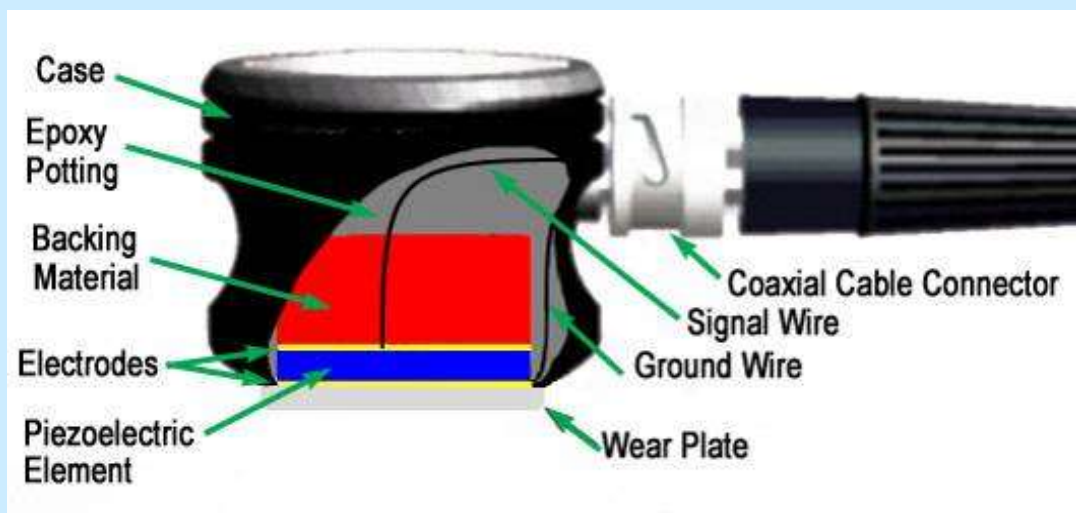
- con laser



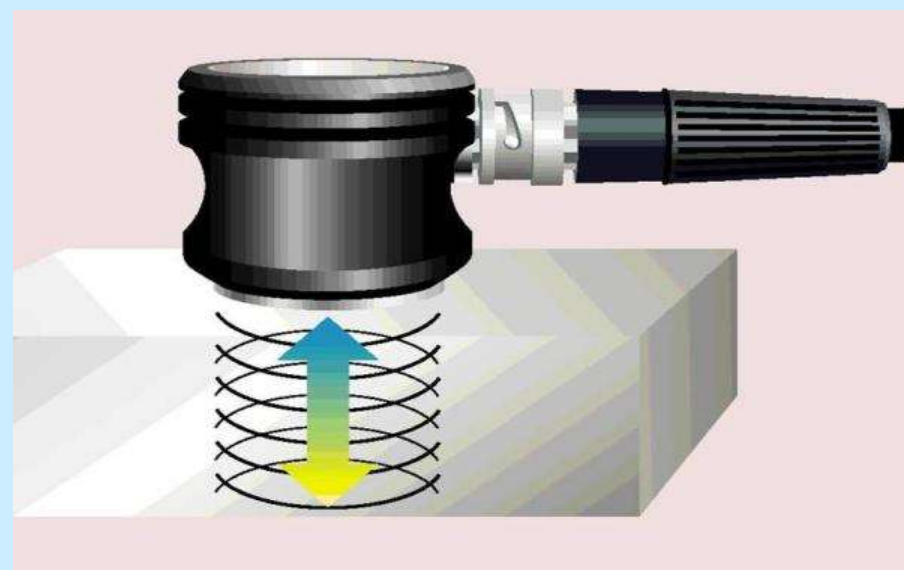
Generazione degli ultrasuoni

Il fascio ultrasonoro è generato da un trasduttore (sonda).

Un trasduttore piezoelettrico converte un impulso elettrico in vibrazione meccanica e viceversa



Il trasduttore, nella maggior parte dei casi, è quindi un sistema ricetrasmittente



Trasduttori ultrasonori



221 Crescent St Waltham MA 02154
Tel: 800-225-8330, 617-899-2740
Fax: 617-899-1552

TRANSDUCER DESCRIPTION

PART NO.: A544S FREQUENCY: 10.00 MHz
SERIAL NO.: 97176 ELEMENT SIZE: .25" DIA.
DESIGNATION: CONTACT

TEST INSTRUMENTATION

PULSER/RECEIVER: PANAMETRICS 5052 UA: #1
DIGITAL OSCILLOSCOPE: LECROY 9400-V2.06FT #3
COMPUTER PROGRAM: VER 1.5 SETUP: DWG. #5979
CABLE: RG-174/U LENGTH: 4 FT.

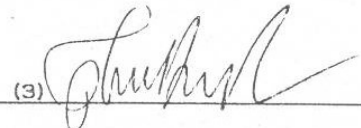
TEST CONDITIONS

PULSER ENERGY: 1
PULSER DAMPING: 50 ohm
RECEIVER SETTING: 40 dB GAIN / 50 dB ATTENUATION
TARGET: BACK WALL OF .50" POLYSTYRENE

MEASUREMENTS PER ASTM E1065

PEAK FREQUENCY ---- 10.65 MHz WAVEFORM DURATION:
CENTER FREQUENCY -- 10.50 MHz @ -14dB LEVEL -- .213 us
UPPER FREQ @ -6dB -- 13.50 MHz @ -20dB LEVEL -- .280 us
LOWER FREQ @ -6dB -- 7.50 MHz @ -40dB LEVEL -- .460 us
BANDWIDTH @ -6dB -- 57.1 % FOCAL LENGTH ----

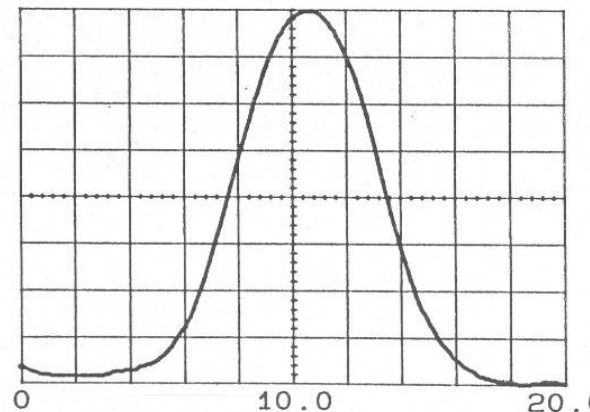
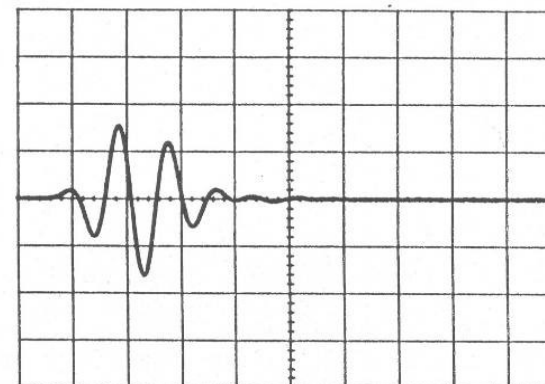
COMMENTS:

TECHNICIAN: (3)  DATE: 08-18-93

TRANSDUCER CERTIFICATION

WAVEFORM

VERTICAL SENSITIVITY: 200 mv/div
HORIZONTAL RESOLUTION: .10 us/div



SPECTRUM

VERTICAL: LINEAR FORMAT
HORIZONTAL: (MHZ)

Trasduttori ultrasonori (Frequenze: 20 kHz – 20 MHz)

Bassa frequenza / alta lunghezza d'onda λ

- **materiali alto assorbimento**
- **grandi spessori**
- **minimo difetto visibile relativamente grande**

Alta frequenza / bassa lunghezza d'onda λ

- **materiali basso assorbimento**
- **piccoli spessori**
- **riduzione minimo difetto visibile**

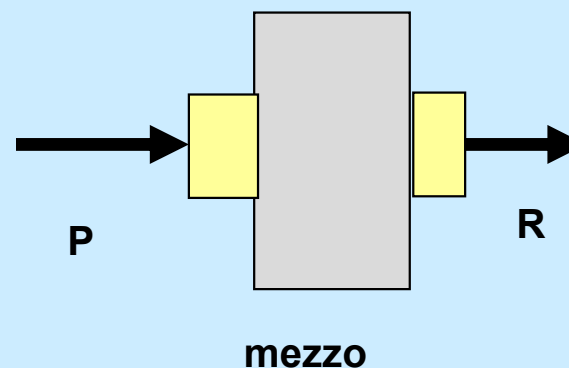


Prove non distruttive mediante ultrasuoni

Caratterizzazione e dimensionamento delle discontinuità

Ispezione con ultrasuoni

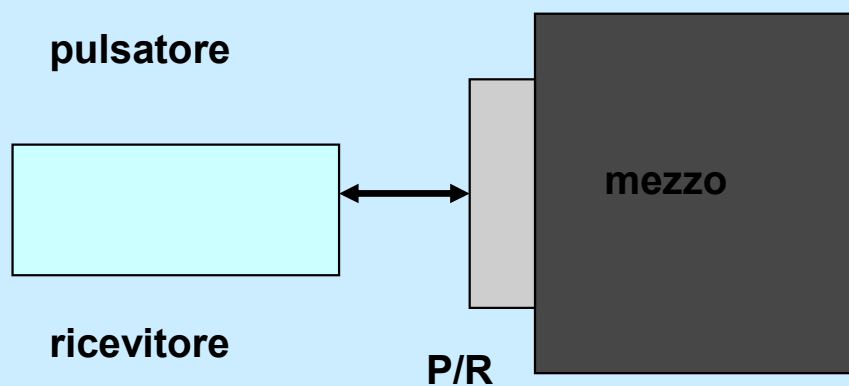
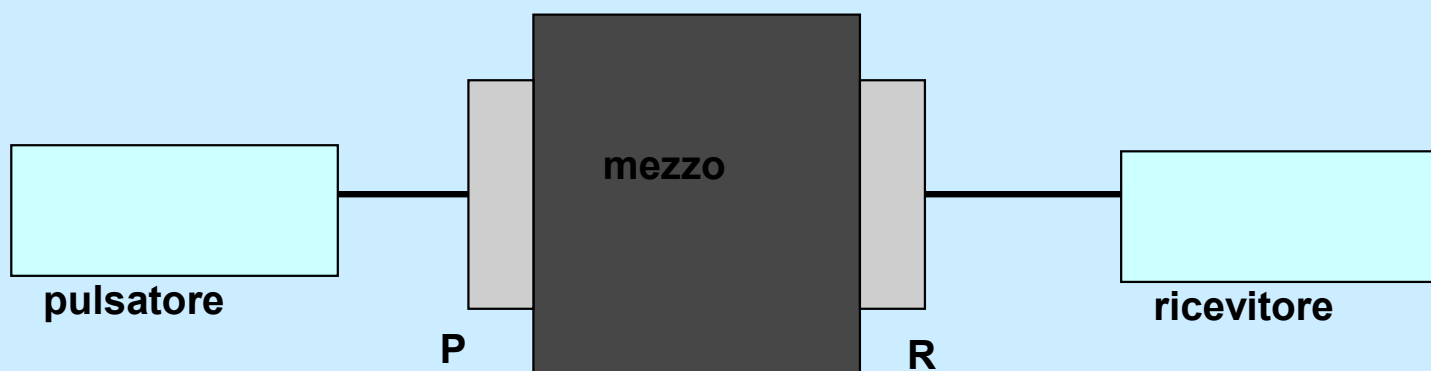
- **emissione impulso ultrasonoro**
- **propagazione impulso nel mezzo**
- **materiale = filtro che modifica il segnale** (direzione, ampiezza, modi di vibrare, velocità, frequenza)
- **ricezione del segnale & confronto con segnale teorico**
- **analisi variazioni; cause; diagnosi**



Tecniche di osservazione

Pulse - Receive

Pulse - Echo

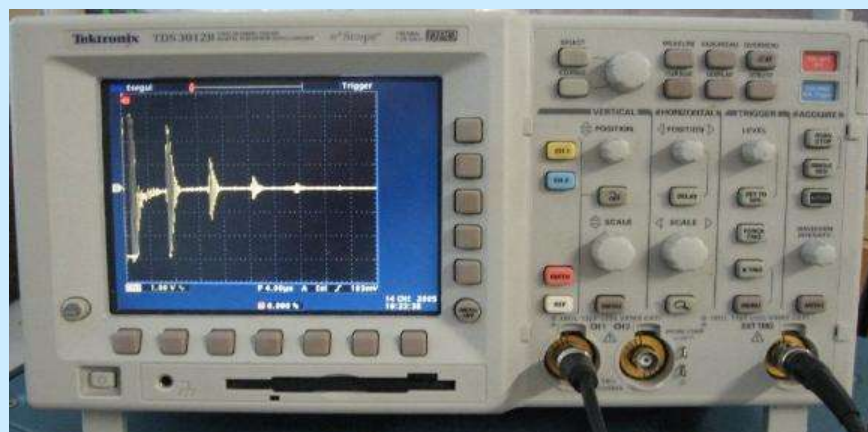


Strumentazione

**Impulsatore
(pulser-receiver)**



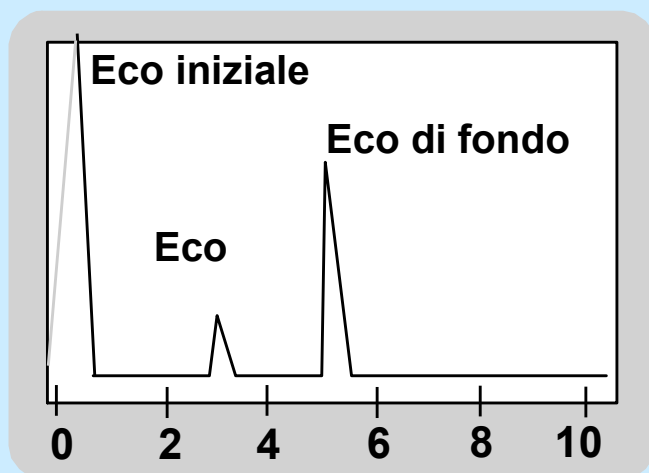
Oscilloscopio



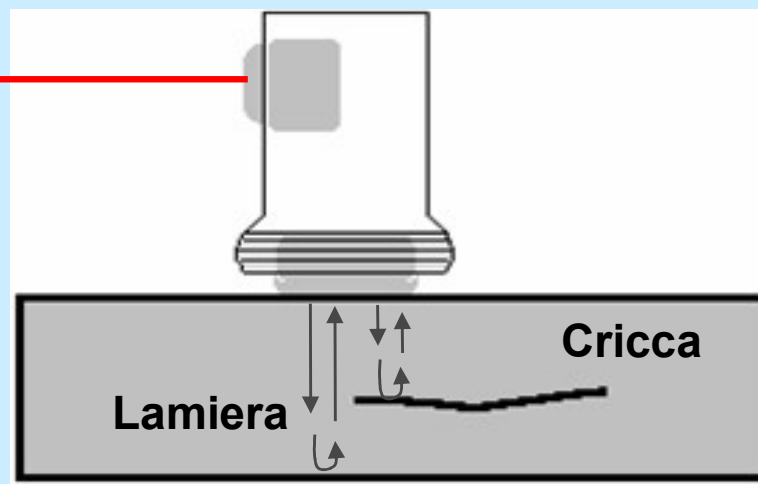
Strumento integrato



Tecniche di controllo: pulse - echo



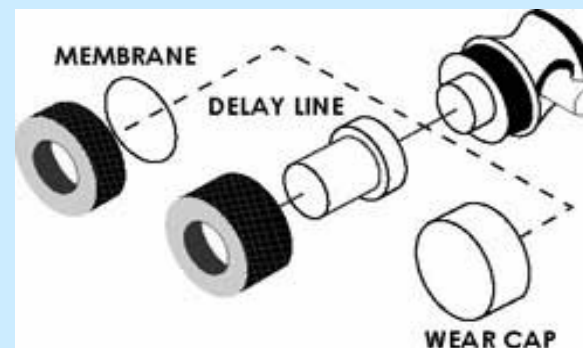
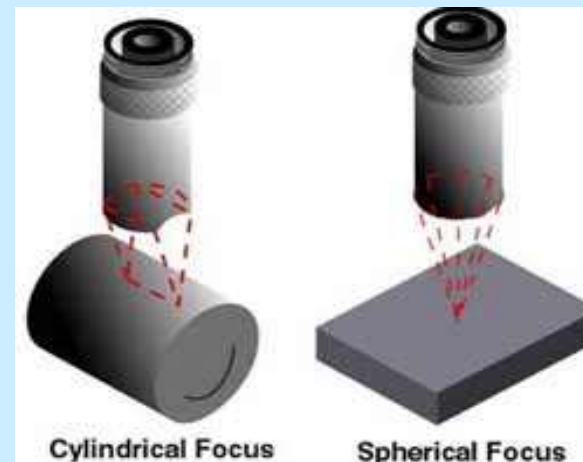
UT Instrument
Screen



- **Nel caso del pulse - echo, una sonda emette il segnale che viene poi ricevuto dalla sonda stessa o da un secondo trasduttore**
- **La quantità di energia riflessa è rappresentata in funzione del tempo, con la possibilità di ottenere informazioni sulle dimensioni e la posizione del riflettore**

Accoppiamento sonda / componente

- **Gel accoppiante**
- **Per immersione**
- **Linee di ritardo**



Pressione sonora

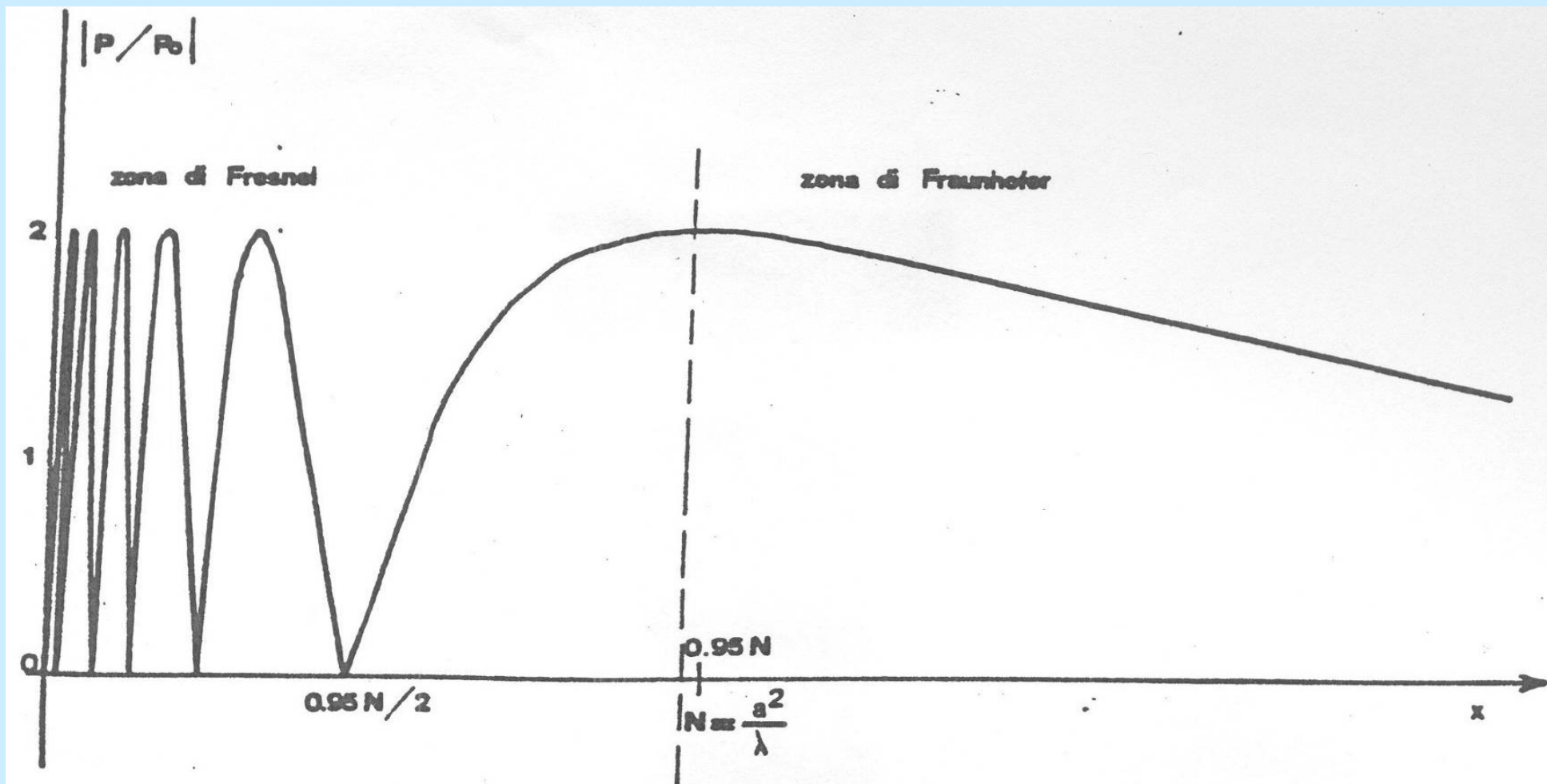


Fig. 109 - Andamento della pressione sonora lungo l'asse del trasduttore.

Campo prossimo. Campo lontano

$$N = \frac{d^2 - \lambda^2}{4\lambda} \cong \frac{D^2}{4\lambda}$$

$$\text{sen } \alpha \propto \frac{\lambda}{D}$$

**(D diametro del
trasduttore)**

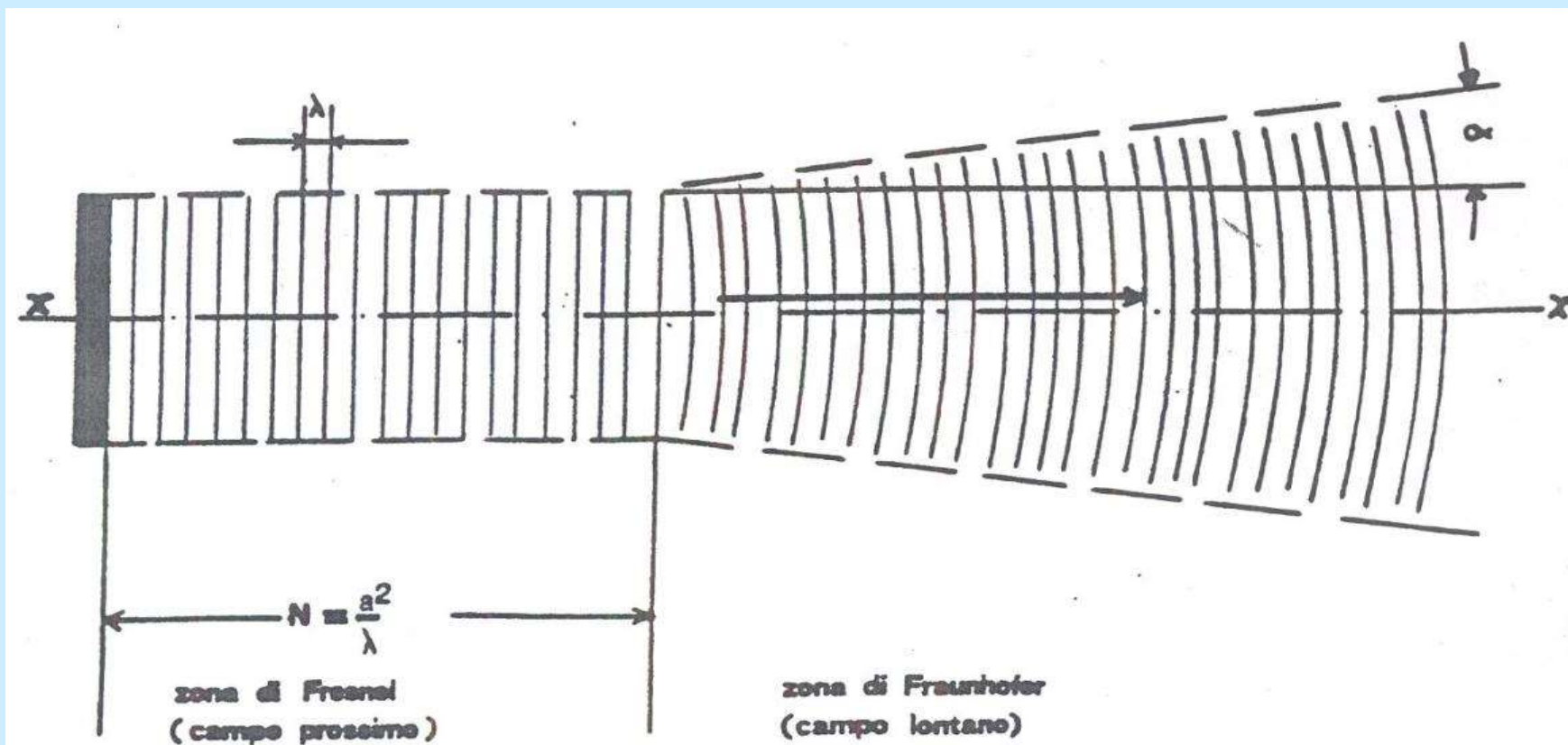


Fig. 110 - Campo di radiazione del trasduttore.

Principali grandezze

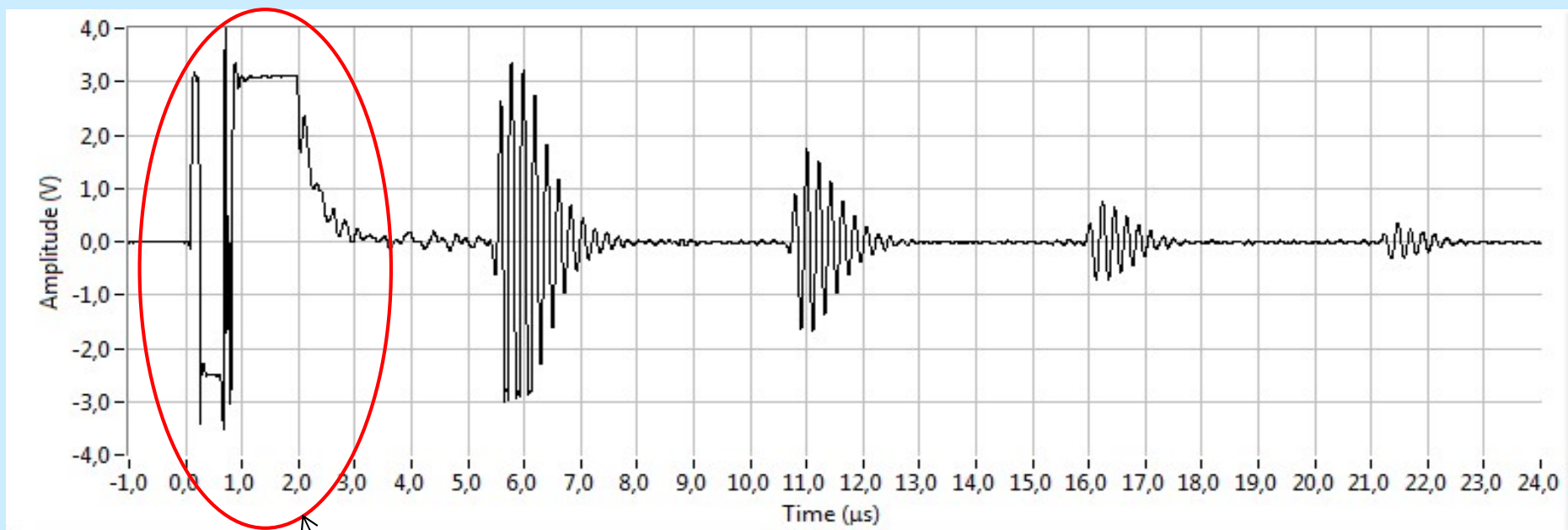
Acciaio [$v = 5850 \text{ m/s}$]								
			D= 0,25"		D= 0,50"		D= 1,00"	
		λ (mm)	N (mm)	λ/D	N (mm)	λ/D	N (mm)	λ/D
Frequenza (MHz)	1	5,85	1,72	0,92	6,89	0,46	27,57	0,23
	2	2,93	3,45	0,46	13,79	0,23	55,14	0,12
	5	1,17	8,62	0,18	34,46	0,09	137,85	0,05
	10	0,59	17,23	0,09	68,93	0,05	275,71	0,02

Alluminio [$v = 6300 \text{ m/s}$]								
			D= 0,25"		D= 0,50"		D= 1,00"	
		λ (mm)	N (mm)	λ/D	N (mm)	λ/D	N (mm)	λ/D
Frequenza (MHz)	1	6,30	1,60	0,99	6,40	0,50	25,60	0,25
	2	3,15	3,20	0,50	12,80	0,25	51,20	0,12
	5	1,26	8,00	0,20	32,00	0,10	128,01	0,05
	10	0,63	16,00	0,10	64,00	0,05	256,02	0,02

Zona morta

(modalità per riflessione)

Da non confondere con il campo prossimo



“zona morta”



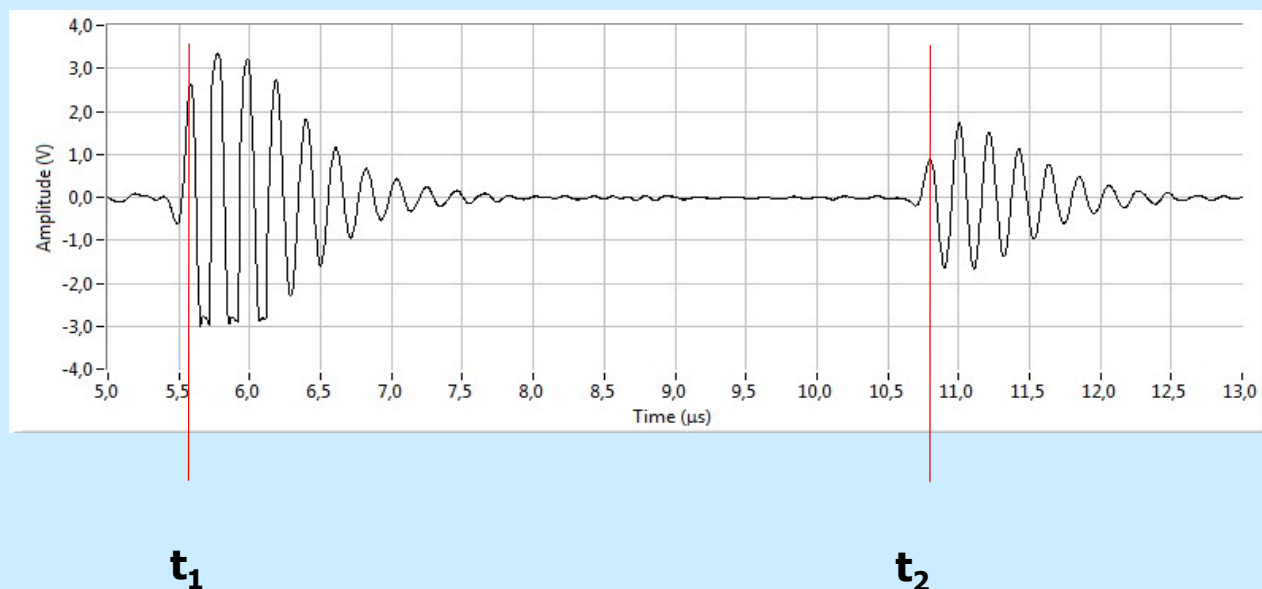
Dimensionamento dei difetti

Fasi:

- **Calibrazione**
- **Rilevazione delle discontinuità**
- **Localizzazione delle discontinuità**
- **Valutazione dell'entità delle discontinuità**

Calibrazione

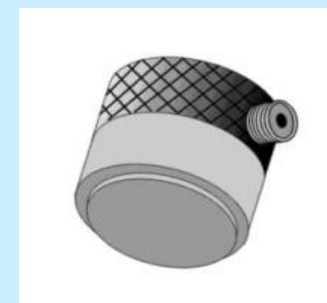
- Calibrazione degli strumenti e delle sonde
- Taratura dell'asse dei tempi (distanze / offset di zero)
- Verifica della sensibilità/risoluzione di riferimento



Calibrazione delle sonde

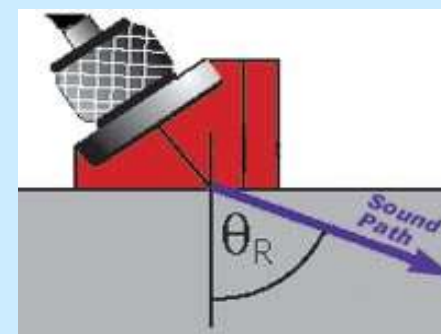
Per le sonde ad incidenza normale è sufficiente calibrare:

- offset dello zero
- velocità



Per le sonde ad incidenza obliqua è necessario anche verificare:

- “bip” (beam index point)
- angolo effettivo



Calibrazione delle sonde

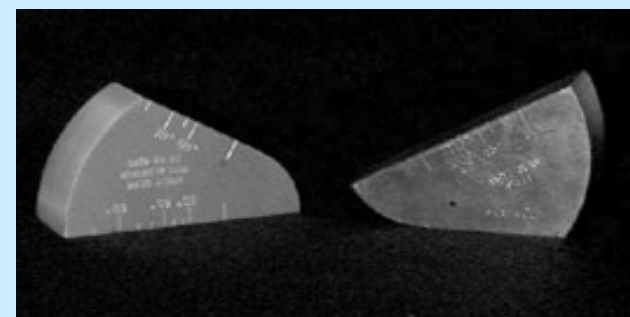
Si usano appositi blocchi di taratura (definiti da normative)



**Verifica sensibilità e
risoluzione**

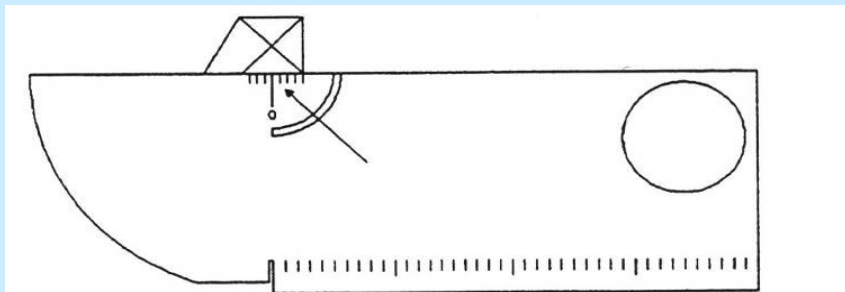


Blocco campione IIW



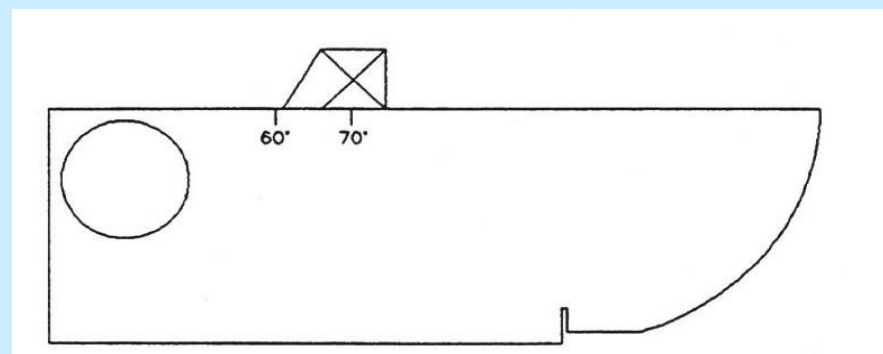
Blocco campione miniaturizzato

Calibrazione delle sonde

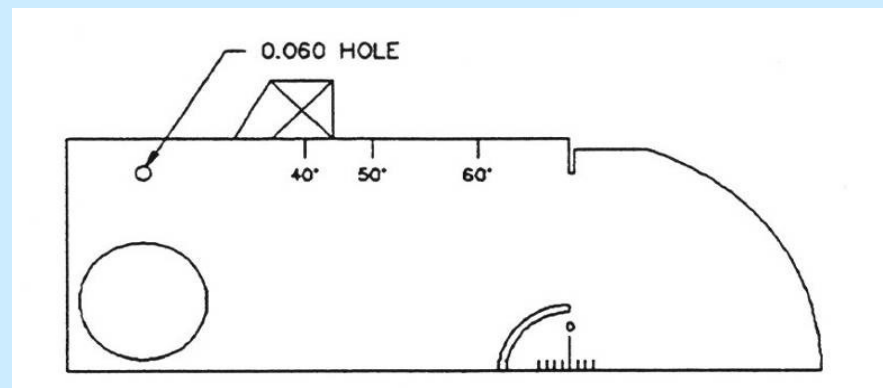
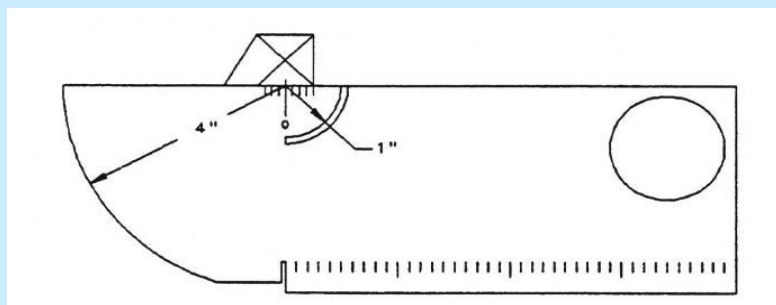


beam index point

angolo rifratto effettivo



velocità/distanza



sensibilità

Dimensionamento dei difetti

Si basa sulla valutazione dell'ampiezza dell'eco riflesso; dipende da:

- **Caratteristiche del riflettore**
 - **conformazione**
 - **orientazione**
 - **rugosità della superficie**
 - **grandezza**
- **Caratteristiche del fascio ultrasonoro**
 - **campo prossimo**
 - **campo lontano**
- **Caratteristiche del componente in esame**

Si distinguono i casi di difetti “piccoli” e “grandi”

Influenza del tipo di riflettore

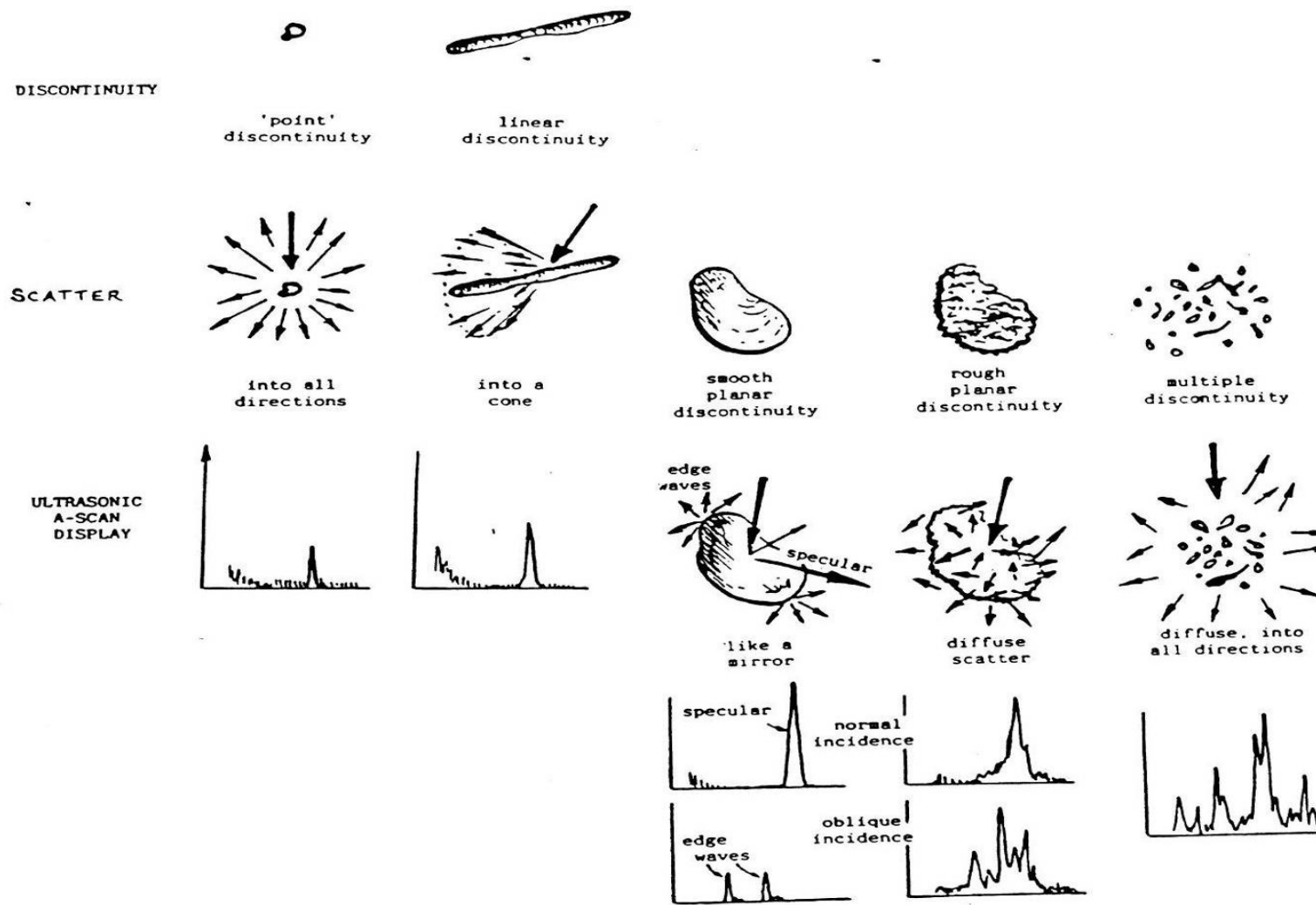


Figure A5-5. Patterns of ultrasonic scatter from typical weld discontinuities and the corresponding A-scan displays.

Comportamento del “grande riflettore” (in termini di ampiezza dell’eco)

$$H_r = H_0 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{A}$$

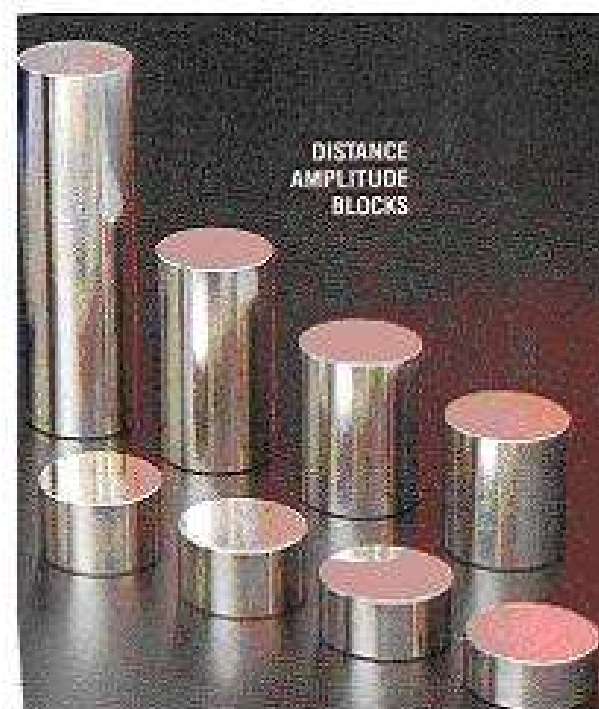
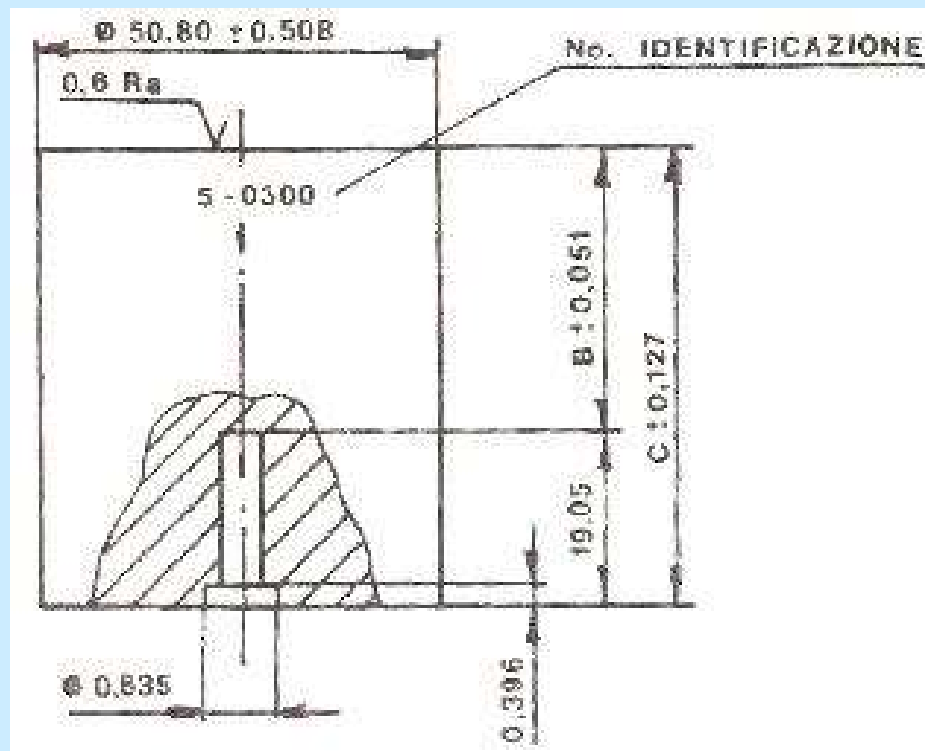
Comportamento del “piccolo riflettore”

$$H_f \propto \pi^2 \cdot \frac{G^2}{A^2}$$

dove $A = a/N$ e $G = D_f/D_s$

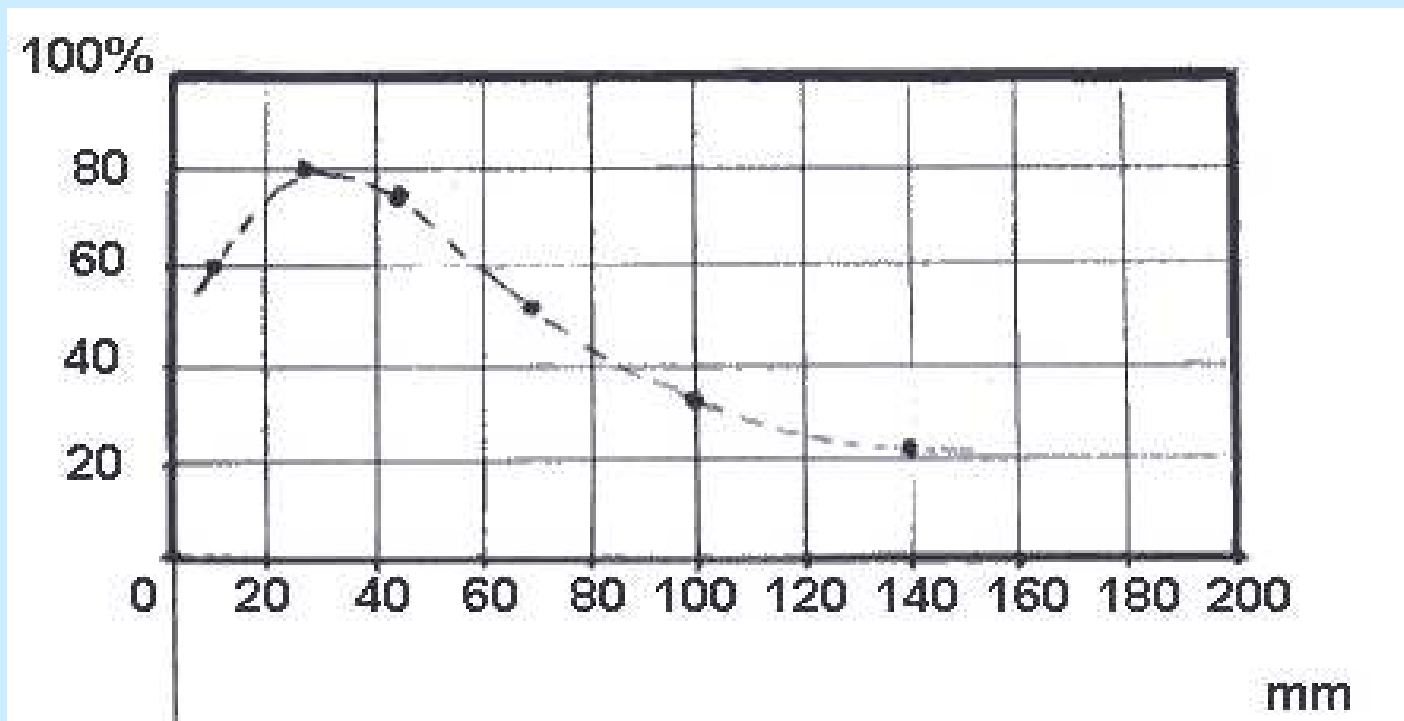
(a distanza del riflettore, N lunghezza del campo prossimo, D_f dimensione del riflettore, D_s dimensione della sonda)

Curve DAC Blocchi campione ASTM



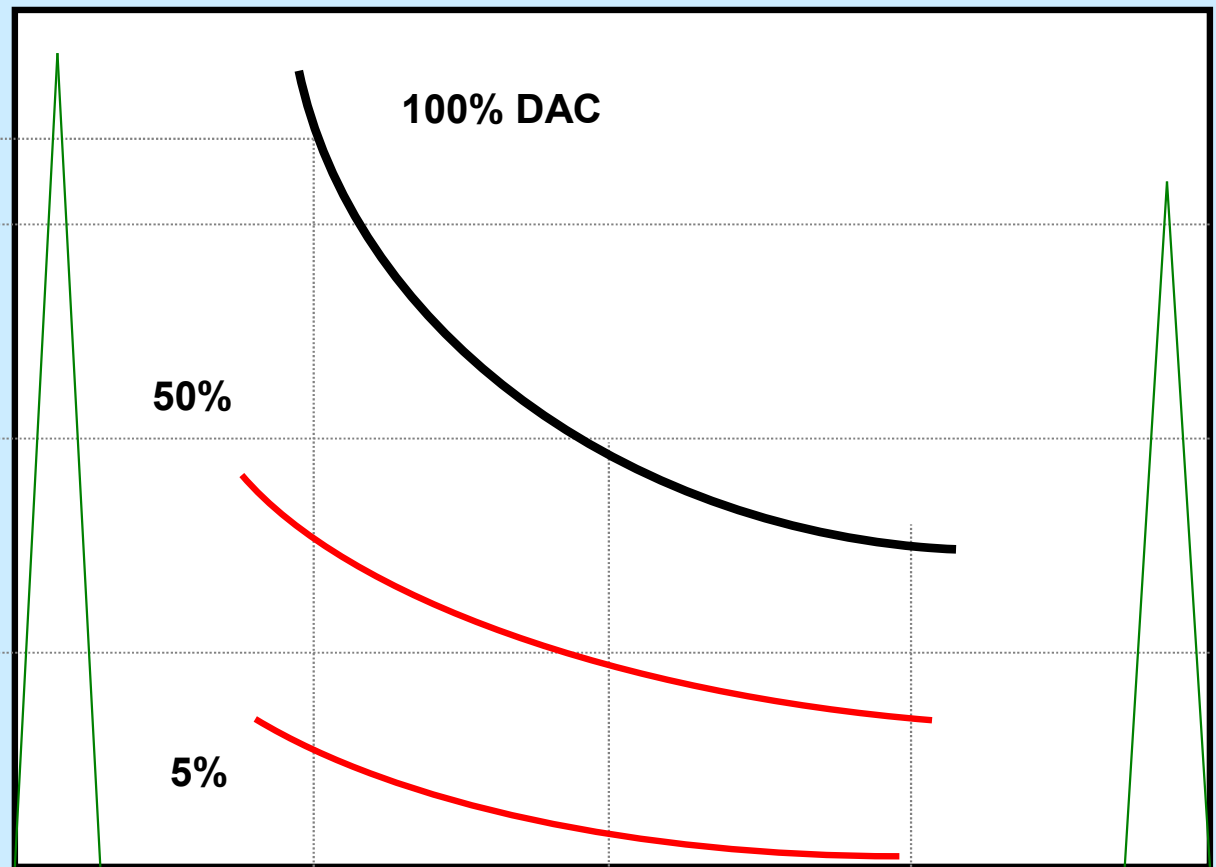
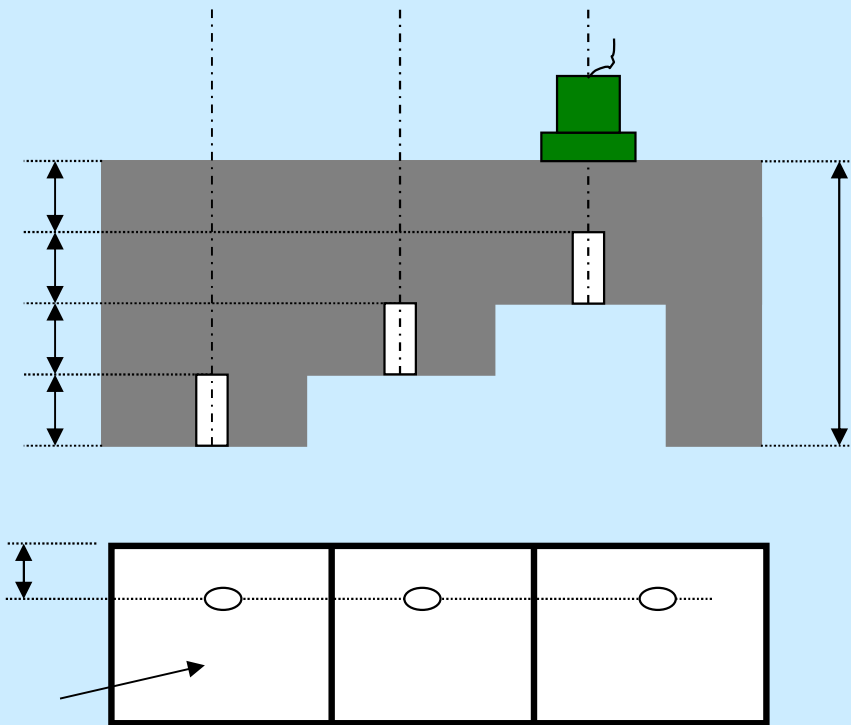
Per difetti più piccoli del fascio incidente

Curve DAC

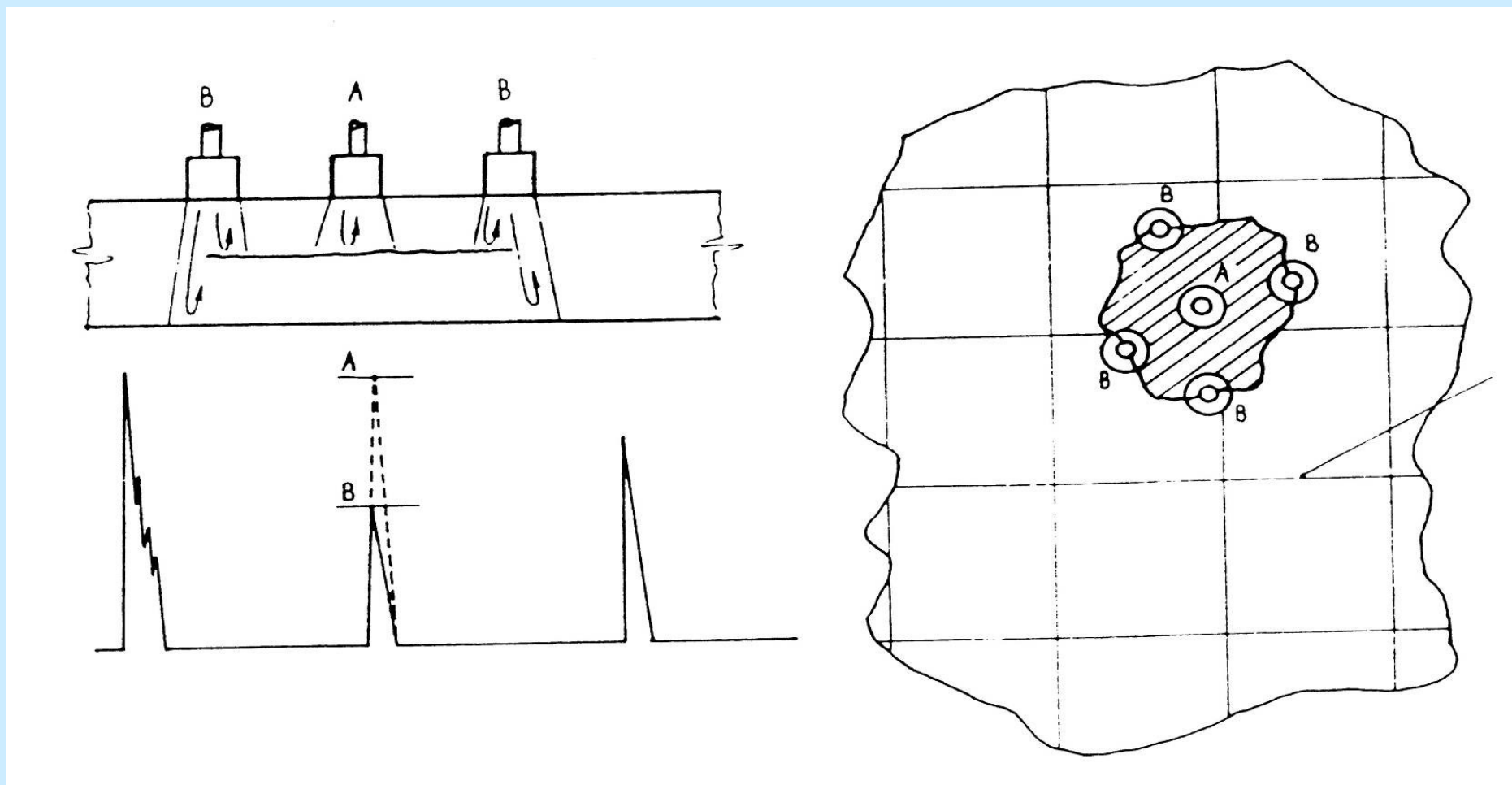


Esempio di curva distanza-ampiezza

100% - 50% - 5% DAC

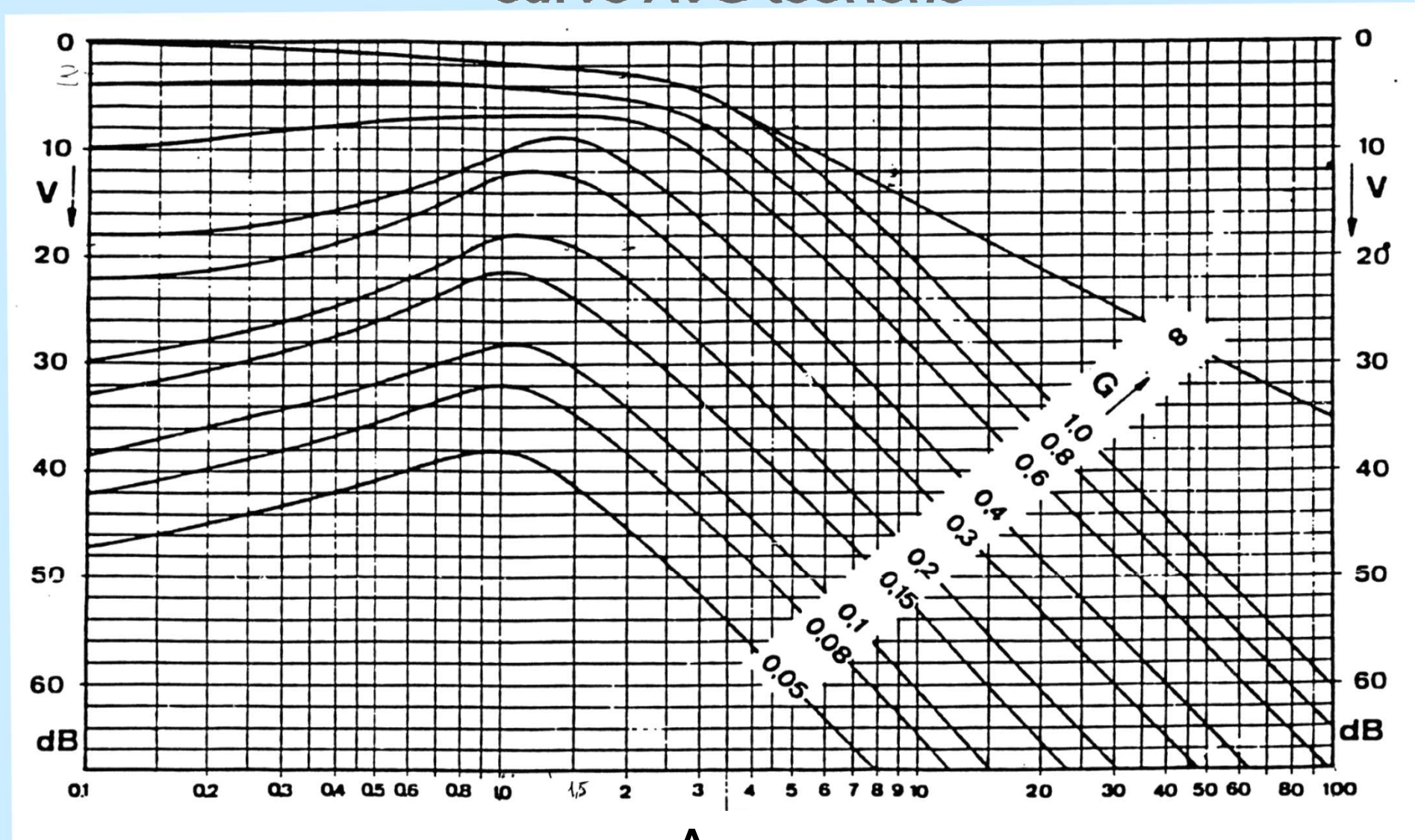


Dimensionamento difetto (grande riflettore): 6 dB drop



Per difetti più grandi del fascio incidente

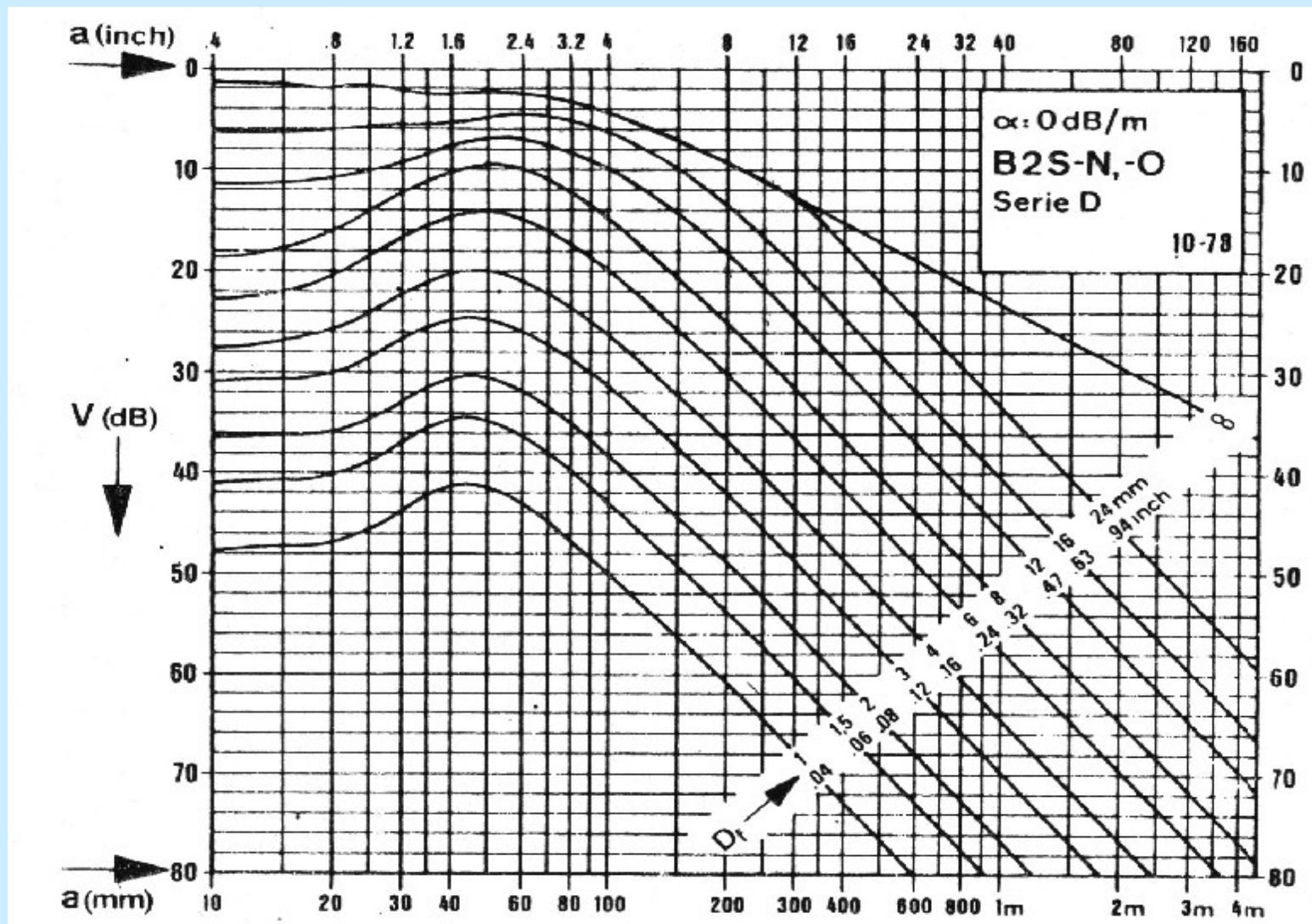
Dimensionamento difetto ("piccolo"): curve AVG teoriche



$$A = a / Ne \quad G = D_f / D_s$$

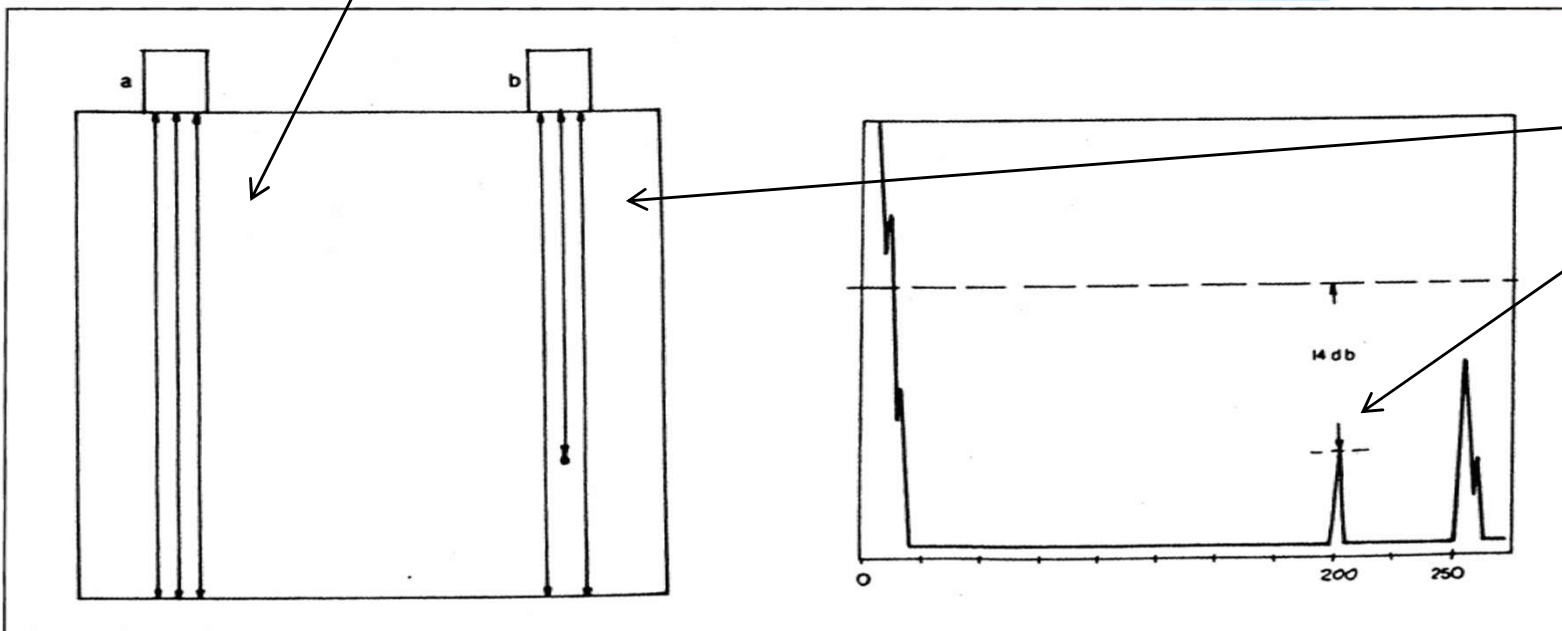
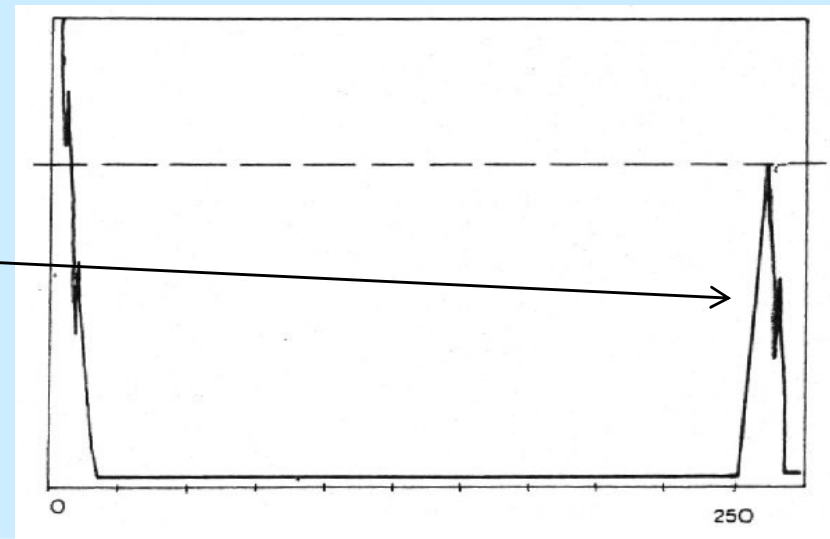
A

Dimensionamento difetto "piccolo": curve AVG sperimentali



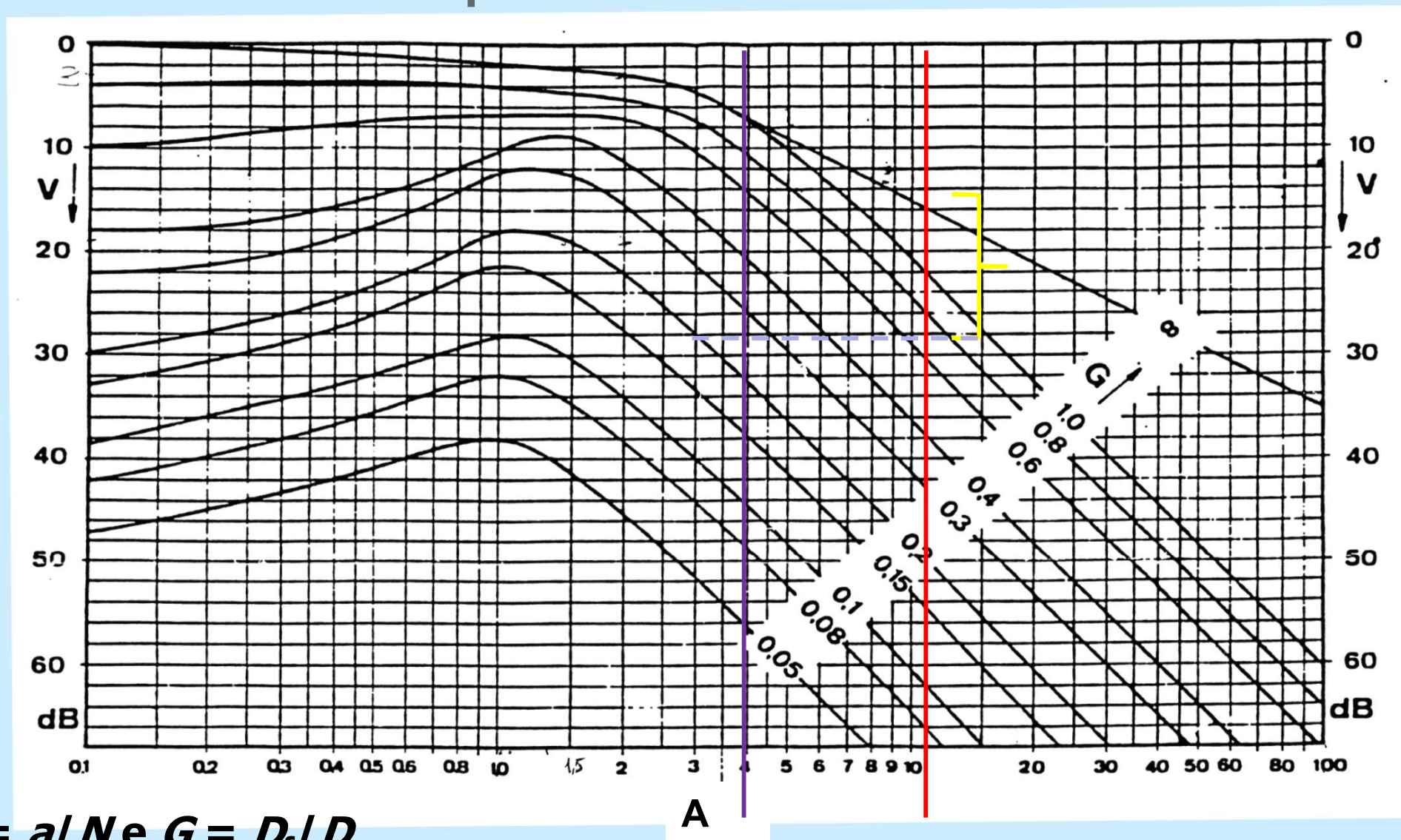
Dimensionamento difetto con le curve AVG

Eco di fondo pezzo



Eco del difetto

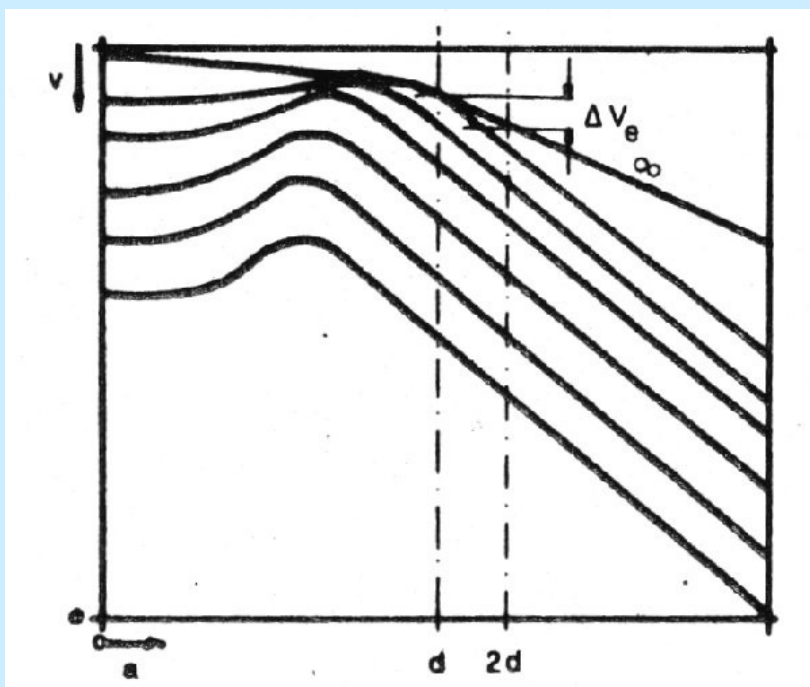
Dimensionamento difetto: esempio con curve AVG teoriche



$$A = a/Ne \quad G = D_f/D_s$$

Valutazione attenuazione: curve AVG

Sul display, differenze fra i primi
due echi di fondo pezzo: (ΔV_g)



Sul diagramma AVG
teorico (ΔV_e)

$$\Rightarrow \Delta V = \Delta V_g - \Delta V_e$$

(coefficiente di attenuazione) $\alpha = \frac{\Delta V}{d} \left[\frac{\text{dB}}{\text{mm}} \right]$

Se si trascura l'attenuazione la dimensione del difetto viene
sovrastimata

NORMA ITALIANA	Prove non distruttive Esame ad ultrasuoni Parte 5: Caratterizzazione e dimensionamento delle discontinuità	UNI EN 583-5
		OTTOBRE 2004
	Non-destructive testing Ultrasonic examination Part 5: Characterization and sizing of discontinuities	Include aggiornamento A1 (dicembre 2003)
CLASSIFICAZIONE ICS	19.100	
SOMMARIO	La norma specifica i principi generali e le tecniche per la caratterizzazione e il dimensionamento delle discontinuità precedentemente rilevate al fine di valutarle correttamente in rapporto ai criteri di accettazione applicabili. Si applica, in termini generali, alle discontinuità dei materiali e delle applicazioni coperte dalla EN 583-1:1998.	
RELAZIONI NAZIONALI		
RELAZIONI INTERNAZIONALI	= EN 583-5:2000 + A1:2003 La presente norma è la versione ufficiale in lingua inglese della norma europea EN 583-5 (edizione novembre 2000) e dell'aggiornamento A1 (edizione dicembre 2003).	
ORGANO COMPETENTE	Commissione "Prove non distruttive"	
RATIFICA	Presidente dell'UNI, delibera del 22 luglio 2004	

NORMA EUROPEA



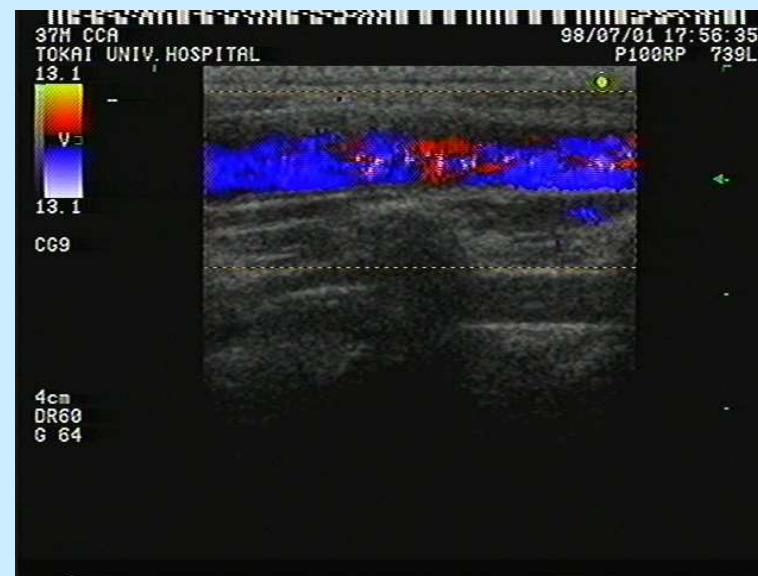
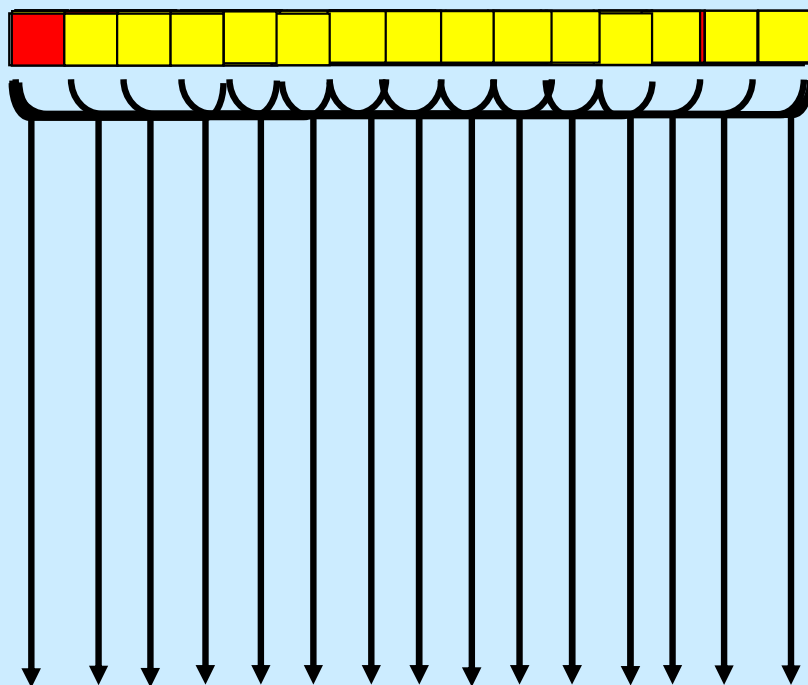
NORMA EUROPEA	Controllo non distruttivo delle saldature Controllo mediante ultrasuoni Tecniche di controllo, livelli di prova e valutazione	UNI EN ISO 17640
		GIUGNO 2011

Non-destructive testing of welds
Ultrasonic testing
Techniques, testing levels, and assessment

La norma specifica le tecniche di controllo manuale mediante ultrasuoni di giunti saldati per fusione di materiali metallici di spessore maggiore o uguale a 8 mm, aventi una bassa attenuazione ultrasonora (specialmente quella dovuta alla diffusione) e a temperature comprese tra 0 °C e 60 °C. La norma è destinata principalmente all'impiego su giunti saldati a piena penetrazione, nei quali sia il materiale di saldatura sia il materiale base sono di acciaio ferritico.

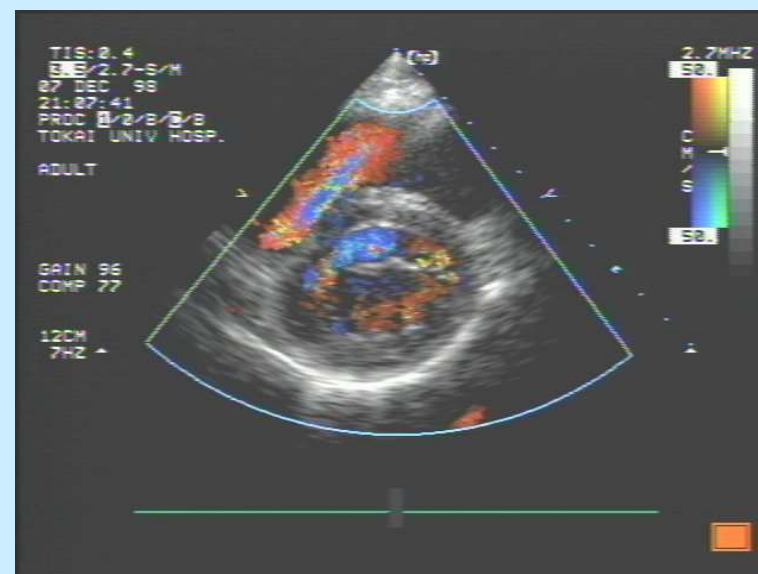
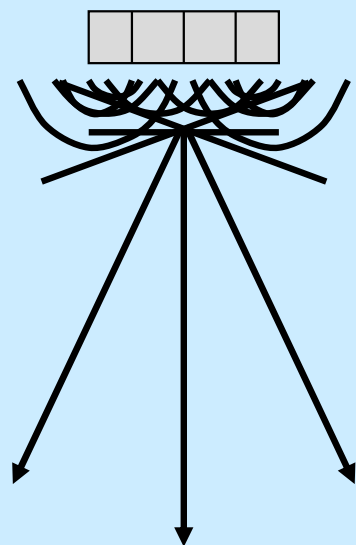
Fare clic per modificare lo stile del titolo dello schema

array a commutazione



Fare clic per modificare lo stile del titolo dello schema

“phased array”





Bibliografia

- **AA. VV., Le prove non distruttive, Associazione Italiana di Metallurgia (cap. VII, cap. XIV)**
- **www.ndt-ed.org**